

Aus der Abteilung für Experimentelle Flugphysiologie
des Flugmedizinischen Instituts in Fürstenfeldbruck
Damaliger Abteilungsleiter: Prof. Dr. H. W. KIRCHHOFF

**Ein Vergleich verschiedener Methoden der Leistungsmessung
unter Bezug auf die Belastungshöhe (W 170)
und Sauerstoffaufnahme (VO_2 170)
zur Eignung in der kardiologischen Praxis**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der Hohen Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen — Nürnberg

vorgelegt von
Dieter Gabisch
aus Nürnberg



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Abteilung für Experimentelle Flugphysiologie
des Flugmedizinischen Instituts in Fürstenfeldbruck
Damaliger Abteilungsleiter: Prof. Dr. H. W. KIRCHHOFF

**Ein Vergleich verschiedener Methoden der Leistungsmessung
unter Bezug auf die Belastungshöhe (W 170)
und Sauerstoffaufnahme (VO_2 170)
zur Eignung in der kardiologischen Praxis**

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Hohen Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen – Nürnberg

vorgelegt von

Dieter Gäbisch
aus Nürnberg

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. L. Demling
Referent: Prof. Dr. J. Schmidt
(Universität Münster)
Correferent: Prof. Dr. E. Wetterer

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Mai 1974

INHALTSVERZEICHNIS

<u>A. Einleitung und Problemstellung</u>	1
<u>B. Kritik der Möglichkeiten der Ergometrie im Hinblick auf die Bedürfnisse in der praktischen Medizin</u>	4
1. Begründung der Wahl der eigenen Methodik	4
2. Kritik der Leistungsgrößen und der Testverfahren im Hinblick auf die Bedürfnisse in der praktischen Medizin	5
2.1. Die Bedeutung der Dauer- und Höchstleistungsfähigkeit für die Kardiologie	5
2.2. Kritik submaximaler Testverfahren im Hinblick auf die Bedürfnisse in der praktischen Medizin	7
2.2.1. Kritik einiger ausgewählter submaximaler Arbeitsversuche	7
2.2.2. Kritik der Bestimmung von Größen der Höchstleistungsfähigkeit durch submaximale Versuche und Extrapolationen	8

Inhalt -II-

2.3.	Untersuchung von Größen der Höchstleistungsfähigkeit auf ihre Eignung für die praktische Kardiologie	10
2.3.1.	Kritik der Größe zur Bestimmung der kardialen Höchstleistungsfähigkeit	10
2.3.2.	Belastungsformen zur Ermittlung der $\dot{W}$ 170 und der $\dot{V}_{O_2}$ 170	14

3.	Schlußfolgerungen aus der Kritik der Möglichkeiten der Ergometrie	14
----	---	----

Anhang zu B:	Beispiele von Nomogrammen zur Ermittlung maximaler und praemaximaler Leistungsgrößen aus submaximalen Leistungen (Seite I bis III des Anhangs zu B)	
--------------	---	--

<u>C. Material und Methodik</u>		17
---------------------------------	--	----

1.	Probanden und Geräte	17
1.1.	Untersuchungsgut	17
1.2.	Verwendete Geräte	17
2.	Versuchsanordnungen	19
2.1.	Ablauf des Versuches mit stufenweiser Belastungssteigerung	19
2.2.	Ablauf der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung	20

Inhalt -III-

2.2.1.	Unmittelbare Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit durch kontinuierliche Belastungssteigerung	20
2.2.2.	Bestimmung des LPI (Leistungspulsindex) nach E.A. MÜLLER durch kontinuierliche Belastungssteigerung	21
3.	Berechnungen der Leistungsdaten und deren statistische Auswertung	21
3.1.	Berechnung der Leistungsdaten des einzelnen Probanden	22
3.2.	Statistische Auswertung der nach den bisher angegebenen Formeln berechneten Leistungs- und Auswertungsdaten	24
Anhang zu "C - 3": Erläuterungen zu den Formeln		26
Anhang zu C: Probanden und verwendete Geräte (Seite I bis III des Anhangs zu C)		
<u>D. Ergebnisse der eigenen Versuche</u>		28
1.	Daten der Leistungsfähigkeit des Untersuchungsgutes	28
1.1.	Ergebnisse des Versuches mit stufenweiser Belastungssteigerung (WAHLUND'scher Versuch)	28
1.2.	Ergebnisse der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung	29

1.2.1.	Ergebnisse des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu einer Pulsfrequenz von 170 Pulsen/min	29
1.2.2.	Ergebnisse des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung in niedrigen Belastungsbereichen (LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER)	31
1.3.	Statistische Analyse der Daten der Leistungsfähigkeit - eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse	31
2.	Daten zu den Vergleichen von Aussagekraft und Genauigkeiten zwischen den einzelnen Versuchen	32
2.1.	Daten zur Beurteilung der Aussagekraft der einzelnen Versuche	32
2.1.1.	Überprüfung der Leistungsdaten des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis 170 Pulse/min an Hand der Leistungsdaten des WAHLUND'schen Versuches	33
2.1.2.	Überprüfung der Leistungsdaten des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER an Hand der Leistungsdaten des WAHLUND'schen Versuches	35
2.1.3.	Überprüfung der Leistungsdaten des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER an Hand der Leistungsdaten des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min	35
2.2.	Daten zur Beurteilung der Genauigkeit der einzelnen Versuche	36

2.2.1.	Überprüfung der Genauigkeit des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis 170 Pulse/min an Hand des Versuches nach WAHLUND	37
2.2.2.	Überprüfung der Genauigkeit des MÜLLER'schen LPI-Versuches an Hand des Versuches nach WAHLUND	39
2.2.3.	Vergleich der Genauigkeit des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER und des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min	39

Anhang zu D:	- Daten der Leistungsfähigkeit des Untersuchungsgutes (Seite I bis XV des Anhangs zu D)	
	- Daten zu den Vergleichen von Aussagekraft und Genauigkeiten zwischen den einzelnen Versuchen (Seite XVI bis XXVII des Anhangs zu D)	

<u>E. Besprechung der eigenen Ergebnisse</u>	41
--	----

1.	Besprechung des Versuches mit stufenweiser Belastungssteigerung (Versuch nach WAHLUND)	42
1.1.	Besprechung der aus dem Versuch nach WAHLUND ermittelten Ergebnisse	42
1.2.	Kritik der praktischen Anwendbarkeit des Versuches nach WAHLUND	43

Inhalt -VI-

2.	Besprechung der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung	44
2.1.	Besprechung des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min	44
2.1.1.	Besprechung der aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min ermittelten Ergebnisse	44
2.1.2.	Kritik der praktischen Anwendbarkeit des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min	46
2.2.	Besprechung des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER	47
2.2.1.	Besprechung der aus dem LPI-Versuch ermittelten Ergebnisse	47
2.2.2.	Kritik der praktischen Anwendbarkeit des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER	49
3.	Schlußfolgerungen aus der Besprechung der eigenen Versuche und Ergebnisse	50
F.	<u>Schlußfolgerungen</u>	53
G.	<u>Zusammenfassung</u>	56

A.

E I N L E I T U N G U N D
P R O B L E M S T E L L U N G

Ergometrie und Spiroergometrie finden in zunehmendem Maße Eingang in die routinemäßig angewandten Untersuchungen der täglichen ärztlichen Praxis. Aus diesem Grunde muß nach hierfür geeigneten Testverfahren gesucht werden, wobei ein ökonomisches Verhältnis zwischen Aufwand und Genauigkeit ein wichtiges Kriterium der Brauchbarkeit eines Versuches darstellt. Dieses Bedürfnis besteht selbst an Institutionen, die sich vorwiegend mit leistungsmedizinischen Problemen befassen. So ist es beispielsweise nach HALHUBER, MILZ und HOFMANN (13) in Rehabilitationskliniken für Herz-Kreislaufkranke aus technisch-organisatorischen Gründen nicht möglich, bei jedem zur Untersuchung anstehenden Fall eine Ergometrie durchzuführen.

Als Routineverfahren sind auch heute noch submaximale Arbeitsversuche beliebt und weit verbreitet. Aus solchen Versuchen lassen sich Größen aus dem Bereich der Höchstleistungsfähigkeit rein mathematisch ermitteln (2, 30, 31). Eine wichtige Bezugsgröße für solche Berechnungen stellt die Maximale Sauerstoffaufnahme dar. Sie kann unmittelbar durch die Vita-maxima-Untersuchung bestimmt werden, womit sich vor allem der KNIPFING'sche Arbeitskreis ausgiebig beschäftigt hat (23, 36, 37). Zwar ist die tatsächlich gemessene und nicht berechnete Maximale Sauerstoffaufnahme das wohl beste Kriterium der kardialen Höchstleistungsfähigkeit, stößt aber bei der experimentellen Ermittlung auf vielfältige und erhebliche Schwierigkeiten. Da außerdem die Maximale Sauerstoffaufnahme von der maximal erreichbaren Pulsfrequenz abhängt, welche trotz der Existenz von Richtwerten (z.B. 7, 12) nur schlecht voraussagbar ist, entstanden im Laufe der geschichtlichen Entwicklung der Ergometrie andere Größen zur Charakterisierung der Höchstleistungsfähigkeit, die einfacher bestimmbar sind und weniger von nicht voraussagbaren Parametern abhängen.

Im Jahre 1948 führte WAHLUND (40) den Begriff der Physical Working Capacity 170 (PWC 170) ein, die richtiger Rate of Work 170 (W 170) genannt wird und nach RUTENFRANZ (32) heute die am weitesten verbreitete Größe zur Charakterisierung der kardialen Leistungsfähigkeit bei Heranwachsenden darstellt. In den Folgejahren wurde dann eine Vielzahl von kurzen, für die Routinediagnostik geeigneten Testverfahren entwickelt. In diesem Zusammenhang seien der von E.A. MÜLLER im Jahre 1950 (27) eingeführte Leistungspulsindex (LPI) sowie das 1952 von ASTRAND und RHYMING (2) aufgestellte Nomogramm zur Ermittlung der Maximalen Sauerstoffaufnahme aus etwa mittleren Belastungen angeführt. Weitere rechnerische Bestimmungen der Maximalen Sauerstoffaufnahme erfolgten durch E.A. MÜLLER aus dem LPI und Grundumsatz (30, 31). Für die tägliche Praxis geeignet wäre auch der sogenannte Steady-state-Versuch, der im allgemeinen 10 Minuten dauert. MELLEROWICZ empfahl dazu eine Belastung von 1 Watt pro 1 kg Körpergewicht (24). Die Auswertung des Steady-state-Versuches kann nach vielen Gesichtspunkten erfolgen, so zum Beispiel mit Hilfe des von BURKHART und KIRCHHOFF (6) angegebenen Leistungsindex. Normalwerte zum Steady-state-Versuch (entsprechend Altersgruppe und Geschlecht) wurden von KIRCHHOFF im Jahre 1965 (20) herausgegeben.

Untersuchungen zur Rate of Work 170 (W 170) und der damit gekoppelten Kreislauf- und Atemgrößen wurden im deutschsprachigen Raum vorwiegend von RUTENFRANZ (30, 31, 32, 33) durchgeführt, und in diesem Zusammenhang auch Bestimmungsvariationen und Berechnungsmöglichkeiten entwickelt, welche die Rate of Work 170 (W 170) der Routinediagnostik zugänglich machen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wird die Fülle der von den verschiedenen Autoren beschriebenen Arbeitsversuche daraufhin betrachtet, welche Verfahren für Routineuntersuchungen in Frage kommen. Sodann werden die stufenweise und kontinuierliche Belastungssteigerung an Hand der Bestimmung der Rate of Work 170 (W 170) und der zugehörigen Sauerstoffaufnahme (V_{O_2} 170) miteinander verglichen, wobei auch hier wieder der zentrale Gesichtspunkt ein ökonomisches Verhältnis

zwischen Aufwand und Genauigkeit sein soll. Aus den theoretischen Vorbetrachtungen und den experimentellen Untersuchungen werden schließlich Vorschläge für den Aufbau und Ablauf leistungsmedizinischer Untersuchungsverfahren gebracht, die sich für die tägliche kardiologische Praxis eignen.

Einige in der Literatur hinsichtlich Belastung und Leistung verschieden gebrauchte Begriffe werden in der vorliegenden Abhandlung folgendermaßen verstanden:

- maximal: Ausbelastung bis zur körperlichen Erschöpfung,
- **praemaximal**: im Bereich der Höchstleistungsfähigkeit gelegen, aber keine völlige Ausbelastung,
- submaximal: alle nicht maximalen und nicht praemaximalen Leistungen betreffend.

B. K R I T I K D E R M Ö G L I C H -
 K E I T E N D E R E R G O M E T R I E

 I M H I N B L I C K A U F D I E

 B E D Ü R F N I S S E I N D E R

 P R A K T I S C H E N M E D I Z I N

1. Begründung der Wahl der eigenen Methodik

Bei der Analyse der körperlichen Leistungsfähigkeit unterscheidet man im wesentlichen die motorische Leistungsfähigkeit, die Muskelkraft und die Leistungsfähigkeit des sogenannten Sauerstofftransportsystems (38). Für die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen zu betrachtende kardiale Leistungsfähigkeit ist allerdings nur die Leistungsfähigkeit des Sauerstofftransportsystems, die **Aerobic Capacity**, von Bedeutung.

Von den verschiedenen Möglichkeiten der technischen Durchführung der Leistungsmessung (Drehkurbelarbeit, Laufband, Step-tests, Fahrradergometer) kommt heute für die Praxis nur noch die Fahrradergometrie im Sitzen oder notfalls auch im Liegen in Frage, obgleich man dabei einige Nachteile in Kauf nehmen muß (5).

Von den Parametern der körperlichen Beanspruchung sind zur Dokumentation der kardialen Leistung die Pulsfrequenz und die Sauerstoffaufnahme am wesentlichsten. Nach SIEBER (34) würde allein die Pulsfrequenz zur Charakterisierung der Leistung genügen. Weil diese aber oft unberechenbaren Einflüssen unterliegt (28), erscheint die Mitbestimmung und Auswertung der Sauerstoffaufnahme doch sehr wichtig. Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme sind

die Parameter der kardialen Beanspruchung, welche in der Praxis der kardialen Funktionsdiagnostik vornehmlich Verwendung finden (HETTINGER, 21. Flugmedizinische Arbeitstagung in Fürstentfeldbruck, 1972).

Zusammenfassend betrachtet ist für die routinemäßig angewandte Ergometrie die Durchführung auf dem Fahrradergometer im Sitzen unter Auswertung der Pulsfrequenz sowie der Sauerstoffaufnahme die Methode der Wahl. Blutdruckmessung und Ekg-Schreibung sollten daneben noch durchgeführt werden, sind aber für die Problematik der vorliegenden rein methodischen Untersuchungen unwesentlich.

2. Kritik der Leistungsgrößen und der Testverfahren im Hinblick auf die Bedürfnisse in der praktischen Medizin

2.1. Die Bedeutung der Dauer- und Höchstleistungsfähigkeit für die Kardiologie

Die kardiale Leistungsfähigkeit läßt sich in die Dauerleistungsfähigkeit und in die Höchstleistungsfähigkeit einteilen.

Als Dauerleistungsgrenze betrachten MELLEROWICZ (24) sowie KIRCHHOFF (18, 20) und JUNG und KIRCHHOFF (17) die Belastungsstufe, bei welcher im Rahmen einer stufenweisen Belastungssteigerung kein Steady-state mehr erreicht wird. Dies würde etwa dem Begriff der Maximalen Ergostase des Arbeitskreises um REINDELL entsprechen. Nach STEGEMANN (35) wird die Dauerleistungsfähigkeit durch eine 15 Minuten dauernde, gleichbleibende Belastung bestimmt, wobei die Regression des Pulsfrequenzanstieges zur Belastung von der 4. Minute bis zur 15. Minute 0,8 nicht übersteigen darf. Die früher oft übliche Defini-

tion der Dauerleistungsfähigkeit als 50 % der aeroben Kapazität ist nach STEGEMANN (35) ein sehr grober und zum Teil auch falscher Wert, der nur bei jungen Probanden stimmen mag. Wenn man nun die Dauerleistungsfähigkeit im Sinne STEGEMANNS definiert, befindet man sich in einem Leistungsbereich, der heute allgemein als Bereich der Dauerleistungsfähigkeit anerkannt sein dürfte, auch wenn andere Definitionen der Dauerleistungsgrenze zugrunde liegen. Diese Dauerleistungsgrenze aber ist in der Kardiologie lediglich zur Beratung hinsichtlich der Alltagsbelastung von Interesse. REINDELL, KÖNIG und ROSKAMM (28) sowie REINDELL, KÖNIG und HOFFMANN (29) betrachten die Höchstleistungsfähigkeit als das für die kardiologische Leistungsmessung notwendige Beurteilungskriterium schlechthin, da die Dauerleistungsgrenze in hohem Maße von peripheren Stoffwechselprozessen abhängt, Herzleistungskapazität und Koronarreserven in nur ungenügendem Maße erfaßt, und da außerdem die Diagnose der sogenannten Belastungsinsuffizienz (29) des Herzens nur durch Erfassung der kardialen Reserven möglich ist. Dieser Sachverhalt sei an einem Beispiel veranschaulicht.

Kontraktionsschwäche des Myokards und progrediente Widerstandserhöhung im peripheren Kreislauf als Folgen des fortschreitenden Alters bedingen eine Verringerung der Schlagvolumenleistung und eine Zunahme der Druckarbeit des Herzens (29), welche letztere zum Beispiel aus dem altersabhängig steigenden Blutdruck (z.B. DÖRING, 7) ersichtlich ist. Diese gegensinnige Beziehung zwischen Druckarbeit und Schlagvolumenleistung mit zunehmendem Alter wurde neben anderen Autoren von KLENSCH (22) beim Menschen bewiesen. Die aus diesen Tatsachen resultierende Belastungsinsuffizienz des Herzens nimmt besonders stark im Alter von etwa 55 Jahren zu (29). Dieser physiologische Knick ist nur bei Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit eindeutig erkennbar. Weil sich aber aus der Erkennung dieser Tatsache im Einzelfall wichtige therapeutische Konsequenzen ergeben können, veranschaulicht das geschilderte Beispiel sehr gut, wie wenig Information die Bestimmung der Dauerleistungsfähigkeit in der Kardiologie geben würde.

2.2. Kritik submaximaler Testverfahren im Hinblick auf die Bedürfnisse in der praktischen Medizin

Versuche mit submaximalen Belastungen erscheinen aus vielen Gründen für die Bedürfnisse der täglichen kardiologischen Praxis zunächst wie zugeschnitten. Sie sind für den Patienten angenehmer als die Austestung der Höchstleistungsfähigkeit und beanspruchen in der Regel weniger Zeit. So stellt sich die Frage, ob diese Vorteile nicht die Nachteile überwiegen, welche sich aus dem Verzicht auf die Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit in der Kardiologie ergeben - Nachteile, auf die bei der Besprechung der Dauerleistungsfähigkeit schon eingegangen wurde.

2.2.1. Kritik einiger ausgewählter submaximaler Arbeitsversuche

Von den submaximalen Verfahren der Leistungsmessung seien zunächst die sogenannten "Step-tests" (z.B. HAVARD, MASTER, HETTINGER-RODAHL, HUGH-JONES) erwähnt. Wegen ihres geringen technischen Aufwandes sind sie zwar relativ vorteilhaft, aber auch nicht besonders genau wegen der physikalisch nicht exakt definierbaren Belastungen. Dazu kommt noch die allgemeine Fragwürdigkeit submaximaler Testverfahren, so daß die "Step-tests" trotz ihrer Einfachheit heute für die Kardiologie kaum mehr in Frage kommen.

Die Steady-state-Belastung auf dem Fahrradergometer in einem mittleren Beanspruchungsbereich mit einer meist zehnminütigen Dauer ist unter den submaximalen Leistungsmeßverfahren dagegen noch heute von großer Bedeutung. Man kann bei diesem Verfahren recht gut das Verhalten der verschiedenen Kreislauf- und Atemgrößen verfolgen. Im einzelnen sind die Regulationsökonomie des Kreislaufs (Erreichen eines Steady-state) im allgemeinen und im besonderen Belastungshypertoniker aus dem Blutdruckverhalten gut erfaßbar (KIRCHHOFF -20-, HALHUBER, MILZ und HOFMANN -13-). Während Sauerstoffaufnahme und Kohlensäureabgabe nur von der Belastung abhängen und interindividuell nicht verschieden sind (17, 18, 19, 20, 21, 30, 31), gibt die Pulsfrequenz beim Steady-state-Versuch, wenn man sie in Relation zur Belastung sieht, begrenzte Auskunft über die Leistungsfähigkeit.

Aussagen über die kardialen Leistungsreserven, auf deren praktische Bedeutung schon öfter hingewiesen wurde, sind jedoch nicht möglich.

Auf der Basis des Steady-state-Versuches gibt es neben der Bestimmung der oben genannten Kreislauf- und Atemgrößen noch eine Vielzahl von Auswertungsmöglichkeiten, zum Teil unter Berücksichtigung der Meßwerte in der Erholungsphase. Auch der von B U R K H A R T und K I R C H H O F F aufgestellte Leistungsindex (6) gehört hierher. Indes bringen auch diese Modifikationen der Auswertung keine wesentlichen neuen Gesichtspunkte im Vergleich zu den bereits oben beschriebenen Auswertungsmöglichkeiten des Steady-state-Versuches. So bleibt auch diese Form eines submaximalen Arbeitsversuches für die Ergometrie in der praktischen Kardiologie nur begrenzt anwendbar.

2.2.2. Kritik der Bestimmung von Größen der Höchstleistungsfähigkeit durch submaximale Versuche und Extrapolationen

Der Sinn der Ermittlung von Größen im Bereich der kardialen Höchstleistungsfähigkeit aus submaximalen Arbeitsversuchen durch Berechnung oder mit Hilfe von Nomogrammen liegt in der besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Versuche und Größen. Nun weichen aber die errechneten Werte oft erheblich von den unmittelbar gemessenen Werten ab, wodurch die erwünschte Vergleichbarkeit von vorneherein ad absurdum geführt wird. Jenseits der Dauerleistungsgrenze gerät nämlich der Organismus in eine zunehmende Sauerstoffschuld (16, 19, 28, 30), was zur Folge hat, daß die Sauerstoffaufnahme, Pulsfrequenz und auch andere Kreislauf- und Atemgrößen nicht mehr dieselben Beziehungen zur vorgegebenen Belastungssteigerung wie in mittleren Leistungsbereichen haben. Dieser Sachverhalt macht zumindest lineare Extrapolationen unmöglich. Darüberhinaus ist zudem das erste Auftreten von Zeichen des anaeroben Stoffwechsels, der zur erwähnten Sauerstoffschuld führt, nicht voraussagbar, da es nach C.G. WILLIAMS et al. (zitiert nach RUTENFRANZ in 38) vom individuellen Trainingszustand abhängt und in einem Bereich zwischen etwa 45 % und etwa 70 % der Maximalen Sauerstoffaufnahme stattfinden kann. Hierdurch

werden Voraussagen auf die Höchstleistungsfähigkeit aus submaximalen Leistungsbereichen erst recht fragwürdig. Schließlich sei noch auf die beträchtliche individuelle Variation der Maximalen Pulsfrequenz hingewiesen, was sich als Fehlerquelle bei rechnerischer Bestimmung der Maximalen Sauerstoffaufnahme auswirkt. Aber selbst wenn eine feste Bezugspulsfrequenz, wie beispielsweise bei der Rate of Work 170 (W 170), vorgegeben ist, reichen die oben erwähnten Fehlerquellen aus, die errechneten Werte erheblich zu verunsichern; und es ist sicher nicht so, daß - wie von RUTENFRANZ dargestellt (30, 31) - bei Personen der 3. Lebensdekade die Pulsfrequenz bis zu 170 Pulsen/min linear mit der Belastung und erst danach geometrisch progressiv steigt.

Nach diesen allgemeinen Ausführungen über die Unzweckmäßigkeit der Bestimmung von Größen aus dem Bereich der Höchstleistungsfähigkeit durch submaximale Versuche und Extrapolationen, sei noch auf einige Beispiele hierzu hingewiesen.

Das Nomogramm von ASTRAND und RHYMING (2) zur Bestimmung der Maximalen Sauerstoffaufnahme aus mittleren Belastungen und die von E.A. MÜLLER (zitiert nach RUTENFRANZ: 30, 31) angegebene Gleichung zur Bestimmung der Maximalen Sauerstoffaufnahme aus dem Grundumsatz und dem MÜLLER'schen LPI bauen beide auf der Annahme auf, daß die Maximale Sauerstoffaufnahme der Summe aus Grundumsatz und Sauerstoffmehraufnahme bei 100 Arbeitspulsen näherungsweise entspricht. Diese von ASTRAND (1) gegebene Definition der Maximalen Sauerstoffaufnahme ist aber - trotz der Existenz von Alterskorrekturfaktoren - durch die schon öfter erwähnten starken individuellen Schwankungen der Maximalen Sauerstoffaufnahme ein zumindest sehr fragwürdiger Näherungswert. Außerdem müßte an der Stelle des Grundumsatzes der Ruheumsatz stehen, auf den sich ja der Arbeitsumsatz aufstockt. In Analogie zu den beschriebenen extrapolatorischen Ermittlungen der Maximalen Sauerstoffaufnahme stellte RUTENFRANZ (30) ein Nomogramm zur Ermittlung der Rate of Work 170 (W 170) aus dem LPI nach E.A. MÜLLER auf. Zwar ist die W 170 im Gegensatz zur Maximalen Sauerstoffaufnahme ein sicherer Bezugswert für Extrapolationen, aber auch bei diesem Nomogramm hat die

gesamte allgemeine Problematik der rein rechnerischen Ermittlung der Höchstleistungsfähigkeit unverändert ihre Gültigkeit; zumal, wie bereits erläutert, die Pulsfrequenz meist schon vor 170 Pulsen/min geometrisch progressiv im Verhältnis zur Belastungssteigerung ansteigt.

Sowohl die allgemeinen Betrachtungen als auch die ausgewählten Beispiele zur Bestimmung von Größen der Höchstleistungsfähigkeit durch Extrapolationen aus submaximalen Versuchen zeigen, daß durch solche Maßnahmen keine neuen Informationen aus den submaximalen Tests gewonnen werden. Die ermittelten Werte haben nur die Benennung von Größen der Höchstleistungsfähigkeit, sind aber nicht charakteristisch für diese. Deshalb scheiden solche Berechnungen auch für die praktische Kardiologie von vorneherein aus.

2.3. Untersuchung von Größen der Höchstleistungsfähigkeit auf ihre Eignung für die praktische Kardiologie

Aus den bisherigen Erörterungen geht hervor, daß, sofern man ergometrische Methoden überhaupt einsetzen will, dann selbst in der täglichen kardiologischen Praxis die unmittelbare Messung der Höchstleistungsfähigkeit wünschenswert ist. Deshalb sei im folgenden auf deren Bestimmungsmöglichkeiten näher eingegangen.

2.3.1. Kritik der Größen zur Bestimmung der kardialen Höchstleistungsfähigkeit

Die kardiale Höchstleistungsfähigkeit im engeren Sinne wird wohl am richtigsten durch die unmittelbare Bestimmung, beispielsweise im Rahmen eines Vita-maxima-Versuches, unter dem Einsatz möglichst vieler Muskelgruppen (z.B. am Drehkurbelergometer) durch konsequente Ausbelastung bis zu dem Punkt, wo die Sauerstoffaufnahme nicht mehr ansteigt, ermittelt. Die damit verbundene Problematik wurde schon in der Einleitung erörtert. Für die Routine-Ergometrie kommt deshalb eine solche Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit nicht in Frage. Versuche dieser

Art bleiben heute Spezialuntersuchungen vorbehalten und wurden vor allem beschrieben von HOLLMANN (16), KNIPPING und VALENTIN (23), VALENTIN und VENRATH (36) sowie von VALENTIN, VENRATH, BALODIMOS und GIOVANNELLI (37). Wird aber die Maximale Sauerstoffaufnahme nicht mit der beschriebenen Gewissenhaftigkeit gemessen, sondern läßt man andere Kriterien des Versuchsabbruches gelten (nach HOLLMANN - 16 - beispielsweise eine Pulsfrequenz von 180/min u.a. mehr) oder richtet sich nach dem von ASTRAND (1) eingeführten und bereits oben diskutierten Näherungswert der Sauerstoffaufnahme bei etwa 100 Arbeitspulsen pro Minute, so wird der Begriff der Maximalen Sauerstoffaufnahme verworren und irreführend. Es handelt sich nämlich dann nicht um die maximale Leistungsfähigkeit, sondern um deren praemaximalen Bereich, für den es geeignetere Größen als die Maximale Sauerstoffaufnahme gibt.

Von den Größen aus dem Bereich der Höchstleistungsfähigkeit (maximale Leistungsfähigkeit und praemaximaler Bereich) haben neben der Maximalen Sauerstoffaufnahme (1, 2, 23, 36, 37) die Maximale Ergostase einschließlich des Maximalen Sauerstoffpulses (28, 29) und die Rate of Work 170 (30, 31, 32, 33, 40) einschließlich der zugehörigen Ventilationsgrößen ($\dot{V}_{O_2}$ 170 usw.) heute die größte Verbreitung gefunden.

Der Begriff der "Ergostase" hat sich aus dem des "Steady-state" aus praktischen Gründen entwickelt. Grundlegende Feststellungen zu diesen Begriffen stammen von KIRCHHOFF (20), MELLEROWICZ, REINDELL, HOLLMANN, MIES und ROSKAMM (25), MELLEROWICZ, ROSKAMM, HETTINGER, HOLLMANN, KLAUS, KÖNIG, MIES, REINDELL und STOBOY (26), REINDELL, KÖNIG und ROSKAMM (28) sowie von REINDELL, KÖNIG und HOFFMANN (29). Unter Maximaler Ergostase versteht man die Belastung bei stufenweiser Belastungssteigerung, bei der sich gerade noch eine Ergostase einstellt (28, 29). Eng verbunden mit dem Begriff der Maximalen Ergostase sind die Begriffe des Maximalen Sauerstoffpulses (28, 29) und des Herzvolumenleistungsquotienten (28, 29). Bei all diesen Größen handelt es sich um praemaximale Leistungsgrößen, die durch eine Reihe steigender Belastungsstufen von meist sechs Minuten Dauer mit Belastungsintervallen von 25 und 50 Watt ermittelt werden. Die Nachteile sind, daß wegen der Belastungsintervalle ein Fehler bis zu fast 50 Watt

im ungünstigsten Fall resultieren kann, daß die Anzahl der Belastungsstufen und somit die Versuchsdauer nicht standardisiert sind, und daß keinerlei feste Bezugswerte (wie z.B. 170 Pulse/min bei der Rate of Work 170) existieren. Der hohe, mögliche Fehler ist selbst für den Praxisbedarf kaum tragbar; und infolge der nicht standardisierten Versuchsdauer verunsichern die nicht vorhersagbaren Einflüsse der Ermüdung die erzielten Ergebnisse. Die Maximale Ergostase und der Maximale Sauerstoffpuls erscheinen als Größen der Höchstleistungsfähigkeit trotz ihrer weiten Verbreitung im deutschsprachigen Raum für die praktische kardiologische Routinediagnostik deshalb wenig geeignet.

Die Rate of Work 170 wurde in Form der Physical Working Capacity 170 von WAHLUND (40) eingeführt. Die Bestimmungsmöglichkeiten werden im Abschnitt "Material und Methodik" beschrieben. Im deutschsprachigen Raum haben sich vor allem RUTENFRANZ und sein Arbeitskreis mit der Bestimmung der Rate of Work 170 und der Ermittlung von Normalwerten befaßt (30, 31, 32, 33). Bei der Rate of Work 170 (W 170) und den analogen Ventilationsgrößen (z.B. $\dot{V}_{O_2}$ 170) handelt es sich um eindeutig definierte, an den Grad der kardialen Beanspruchung gebundene Werte. Es sind also mathematisch exakte Größen, wodurch interindividuelle und intraindividuelle Vergleiche sicherer werden. Weiterhin ist eine Beanspruchung von 170 Pulsen/min jedem Probanden, auch Kranken, die eben schon bei niedrigen Belastungen mit 170 Pulsen/min reagieren, ohne weiteres zumutbar. Trotzdem werden prae-maximale Leistungen erbracht; und damit wird die kardiologisch so wichtige Höchstleistungsfähigkeit getestet. Die $\dot{V}_{O_2}$ 170 hat außerdem die Dimension eines O_2 -Pulses und ist so eine Analoggröße zum Maximalen Sauerstoffpuls. Es ist selbstverständlich, daß entsprechend den alters- und geschlechtsabhängigen maximal erreichbaren Pulsfrequenzen auch der Wert von 170 Pulsen/min nicht unveränderlich sein darf, sondern angepaßt werden muß. Bei männlichen Personen der 3. Lebensdekade, wie sie im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen auf dem Ergometer belastet wurden, sind jedenfalls 170 Pulse/min ein adäquater Wert für prae-maximale Leistungen. Verfälschungen durch psychogen erhöhte Pulsfrequenzen können leicht durch Abwarten einer Normalisierung der Ruhepulsfrequenz vor dem Versuch vermieden werden.

Nach REINDELL, KÖNIG und ROSKAMM (28) zeigt die Rate of Work 170 eine niedrigere Korrelation zum Herzvolumen als der Maximale Sauerstoffpuls. Trotzdem ist die Korrelation mit $p \leq 0,001$ noch hochsignifikant. Außerdem kann aus den gemachten Angaben nicht entnommen werden, ob sich die beiden genannten Korrelationskoeffizienten auch signifikant unterscheiden. Schließlich müßte auch mit dem Maximalen Sauerstoffpuls die $\dot{V}O_2$ 170 und nicht die W 170 verglichen werden.

Die Rate of Work 170 (W 170) und die damit verbundenen Kreislauf- und Ventilationsgrößen haben eine Reihe Vorzüge, die sie als Bezugsgrößen im praemaximalen Leistungsbereich für die ergometrische Ermittlung der Höchstleistungsfähigkeit besonders geeignet erscheinen lassen.

Eine Tatsache von erheblicher Bedeutung besteht in den engen Korrelationen der diskutierten maximalen und praemaximalen Leistungsgrößen untereinander. Die Proportionalität der Maximalen Sauerstoffaufnahme zur körperlichen Leistungsfähigkeit wurde neben anderen Autoren erstmals von ASTRAND (1) beschrieben. Nach WIRZ (42) fällt die Maximale Ergostase etwa mit einer belastungsinduzierten Pulsfrequenz von 170 Pulsen/min zusammen, sofern es sich um Probanden der 3. Lebensdekade handelt. Nach RUTENFRANZ (30, 31) bestehen zwischen der Maximalen Sauerstoffaufnahme und der Rate of Work 170 (W 170) lineare Beziehungen, was für die Tatsache spricht, daß beide Größen die Höchstleistungsfähigkeit charakterisieren. TORNWALL (zitiert nach RUTENFRANZ, 30) fand zwischen der Rate of Work 170 (W 170), der Maximalen Physical Working Capacity ($PWC_{\max. 6'}$), welche etwa der Maximalen Ergostase entspricht, und der Maximalen Sauerstoffaufnahme lineare und eng korrelierte Beziehungen untereinander. Wichtig ist auch, daß nicht nur der Maximale Sauerstoffpuls, sondern alle genannten Größen eng mit dem Herzvolumen korrelieren, so daß sie alle für die Erstellung eines Herzvolumenleistungsquotienten in Frage kommen könnten (28, 29). Nach HOLLMANN, VALENTIN, VENRATH und BONNEKOH (15) ist der Maximale Sauerstoffpuls darüberhinaus eine von Intensität und Dauer der Belastung unabhängige und interindividuell verschiedene Leistungsgröße. Sie ist damit ohne weiteres mit der $\dot{V}O_2$ 170 in enge Beziehung zu setzen.

Die Korrelationen der maximalen und praemaximalen Leistungsgrößen untereinander beweisen, daß W_{170} und $V_{O_2 170}$ gute Leistungsgrößen sind und wegen ihrer oben ausführlich geschilderten, insbesondere praktisch orientierten Vorzüge sich somit für die ergometrische Routinediagnostik der Höchstleistungsfähigkeit geradezu anbieten.

2.3.2. Belastungsformen zur Ermittlung der W_{170} und der $V_{O_2 170}$

Zum Problemkreis der praktischen Durchführung der Messung praemaximaler Leistungsgrößen sei auf eine Studie von BÜRGER (4) hingewiesen. Es werden der "Intermittent multiple load test (IMLT)", der "Continuous increasing multiple load test (CMLT)" und der "Single load test (SLT)" verglichen. Dabei ergab sich, daß bei den verschiedenen Belastungsformen die Leistungsdurchschnittswerte der jeweils erreichten Höchststufen etwa gleich waren, und daß somit die zwischengeschalteten Pausen beim IMLT überflüssig sind. Die Belastungsform des CMLT erscheint deshalb am günstigsten, während der SLT, der nicht mit dem Steady-state-Versuch verwechselt werden darf, sich aus Zeitersparnisgründen vorzüglich für Kontrollen an Probanden eignet, die sich schon einmal der Belastungsform des CMLT unterzogen haben.

Im experimentellen Teil der vorliegenden Untersuchungen wird die Belastungsform des CMLT (Belastungsanstieg in 6-minütigen Belastungsstufen) mit der kontinuierlich ansteigenden Belastung verglichen, wobei dann in Zusammenschau mit der BÜRGER'schen Studie (4) die wichtigsten Belastungsformen zur Bestimmung praemaximaler Leistungsgrößen der Diskussion unterzogen worden sind.

3. Schlußfolgerungen aus der Kritik der Möglichkeiten der Ergometrie

Aus den Betrachtungen der Möglichkeiten der Ergometrie, ausge-

richtet nach dem Gesichtspunkt der Bedürfnisse in der praktischen Medizin, ergeben sich eine Reihe wichtiger Schlussfolgerungen.

- (1) In der Kardiologie interessiert vor allem die Erfassung der Leistungsreserven des Herzens, welche am besten mit der maximalen Leistungsfähigkeit des Sauerstofftransportsystems, der Aerobic Capacity, bestimmt werden können.
- (2) Für die Routinediagnostik kommt heute nur noch die Fahrradergometrie trotz ihrer vielen den großen Vorteilen gegenüberstehenden Nachteile in Frage (5, 14). - Neben Ekg-Schreibung und Blutdruckmessung genügt für die tägliche Praxis die Bestimmung von Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme.
- (3) Die Dauerleistungsfähigkeit sollte für kardiologische Fragen nur im Zusammenhang mit der Höchstleistungsfähigkeit bestimmt werden, da die Erstere allein nur begrenzt Informationen für die Leistungsfähigkeit des Herzens liefert.
- (4) Submaximale Testverfahren sind ähnlich wie die Dauerleistungsfähigkeit zu beurteilen. So gibt der zehnmünütige Steady-state-Versuch im wesentlichen nur Auskunft über die Regulationsökonomie des Kreislaufs und erweist sich als gut geeignet für die Erfassung der Belastungshypertonie (13). Die Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit ist bei Berücksichtigung der von HALHUEBER und HOFMANN (12) sowie der von BÜRGER (5) angegebenen Kontraindikationen zur Ergometrie und Indikationen zum vorzeitigen Abbruch auch praktisch gefahrlos.
Die Berechnung von Größen der Höchstleistungsfähigkeit, beispielsweise mit Hilfe von Nomogrammen, aus submaximalen Tests ist für kardiologische Fragestellungen ebenfalls nur begrenzt geeignet.
- (5) Aus praktischen Gründen können nur praemaximale Leistungsgrößen routinemäßig bestimmt werden, um die Höchstleistungsfähigkeit zu beschreiben. Nach KÖNIG (in 28) kann jeder Herzkranke bis zu 70 % seiner maximal erreichbaren Pulsfrequenz (Infarktkranke bis 60 % der Maximalen Pulsfrequenz) ohne Risiko belastet werden. Dies entspricht praemaximalen Leistungen. Die Bestimmung der echten Maximalen

Sauerstoffaufnahme wäre versuchstechnisch auch zu kompliziert.

Von den Leistungsgrößen im Bereich der praemaximalen kardialen Beanspruchung erscheinen die Rate of Work 170 (W 170) und die ihr entsprechenden Kreislauf- und Atemgrößen (z.B. $\dot{V}_{O_2}$ 170) für Klinik und Praxis am geeignetsten.

- (6) Die Bestimmung der eng miteinander korrelierenden Leistungsgrößen der Höchstleistungsfähigkeit erfolgt am besten durch stufenweise Belastungssteigerung in mehrminütigen Belastungsstufen (Continuous multiple load test - CMLT). Auf jeder Stufe sollte die Ergostase abgewartet werden, zu deren Kontrolle eine mindestens 5-minütige Belastung auf einer Stufe nötig ist, was beispielsweise bei den von HOLLMANN (16) vorgeschlagenen 3-minütigen Belastungsstufen bei Bestimmung der Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit in einem Arbeitsgang nicht gegeben ist.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß für die Ergometrie im Rahmen der praktischen Kardiologie die Fahrradergometrie unter Bestimmung von Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme nebst Ekg-Schreibung und Blutdruckmessung die Methode der Wahl ist. Es sollte die Höchstleistungsfähigkeit, am besten in Form der W 170 und der ihr entsprechenden Größen, durch unmittelbare Messung und nicht durch Berechnung bestimmt werden. - Die hierfür möglichen Belastungsformen wurden in eigenen experimentellen Untersuchungen überprüft, welche in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Im wesentlichen handelt es sich um einen Vergleich zwischen stufenweiser Belastungssteigerung mit Abwarten einer Ergostase auf jeder Stufe, worauf bisher schon des öfteren eingegangen wurde, und kontinuierlicher Belastungssteigerung, wie sie vor allem von RUTENFRANZ und seinem Arbeitskreis (30, 31, 32, 33) vorgeschlagen und angewandt wird.

ANHANG ZU B

Beispiele von Nomogrammen zur Ermittlung maximaler und praemaximaler Leistungsgrößen aus submaximalen Leistungen

Abbildung 1 des Anhangs zu B

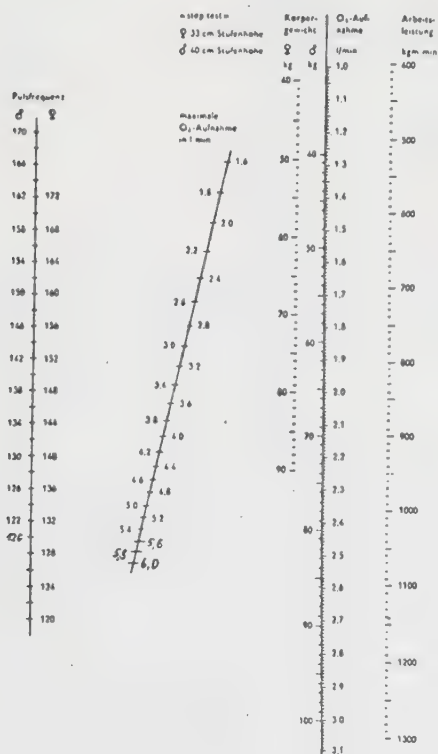


Abbildung 2 des Anhangs zu B

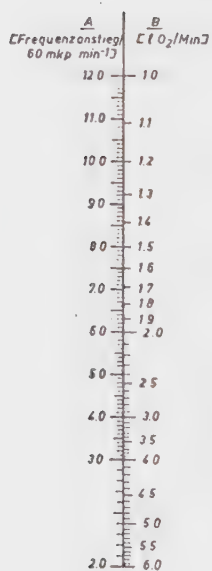
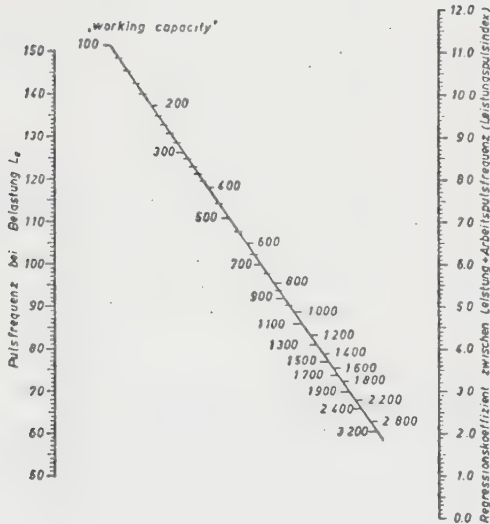


Abbildung 3 des Anhangs zu E



zu Abb. 1: Nomogramm nach ÅSTRAND und RHYMING zur Ermittlung der Maximalen Sauerstoffaufnahme aus submaximaler Belastung (entnommen aus Nr. 16 des Literaturverzeichnis)

zu Abb. 2: Nomogramm zur Ermittlung der Maximalen Sauerstoffaufnahme (B) aus dem LPI nach E.A. MÜLLER (A). Zum ermittelten Wert der Sauerstoffaufnahme muß noch der Grundumsatz addiert werden. (entnommen aus Nr. 30 des Literaturverzeichnis)

zu Abb. 3: Nomogramm zur Ermittlung der W_{170} aus dem LPI nach E.A. MÜLLER und der Anfangsbelastung L_a . Die W_{170} ist dabei in m kp min^{-1} auf der schrägen Leiter ablesbar, wobei allerdings die Anfangsbelastung L_a noch hinzuaddiert werden muß. (entnommen aus Nr. 30 des Literaturverzeichnis)

C.

M A T E R I A L . U N D

M E T H O D I K

1. Probanden und Geräte

1.1. Untersuchungsgut

Bei der Auswahl der Testpersonen kam es auf ein möglichst einheitliches Untersuchungsgut an, da lediglich methodische Fragen zur Erörterung anstehen. Untersucht wurden 60 Bundeswehrsoldaten, die am Ende der 2. Lebensdekade oder in der 3. Lebensdekade standen. In diesem Alter sind Pulsfrequenzen von 170 Pulsen pro Minute adäquate Größen für eine praemaximale kardiale Beanspruchung. Andere Altersgruppen und Geschlechtsunterschiede hätten infolge der Alters- und Geschlechtsabhängigkeit der Pulsfrequenz zu nicht vergleichbaren Ergebnissen geführt und die Klärung der zu lösenden methodischen Fragen erheblich behindert.

Die Probanden waren, wie aus den entsprechenden Gesundheitskarten entnommen und durch eigene anamnestische Erhebungen und klinische Untersuchungen bestätigt werden konnte, durchwegs gesund und in guter körperlicher Verfassung. Es wurden zwar eine Reihe anamnestischer Angaben (z.B. Sportanamnese) und anthropometrischer sowie klinischer Daten protokolliert, deren Auswertung aber für methodische Fragen nicht erforderlich war.

1.2. Verwendete Geräte

Die P u l s f r e q u e n z wurde photoelektrisch am Ohrläp-

chen mit einem Integralspulsmeßgerät bestimmt.

Der Ruheumsatz wurde sowohl mit dem FLEISCH'schen Metabometer (9) unter Ruhebedingungen als auch mit dem FLEISCH'schen METABOGRAPHEN (9) zu Beginn von zwei der insgesamt drei Arbeitsversuche gemessen, wodurch eine vergleichende Kontrolle der Geräte und der Werte ermöglicht wurde.

Der Arbeitsumsatz während zwei der insgesamt drei Belastungsversuche wurde mit dem FLEISCH'schen Metabographen (9) ermittelt. Aufgezeichnet wurden die Sauerstoffaufnahme und die Kohlendioxydabgabe in STPD, das Atemzeitvolumen in BTPS sowie die Atemtiefe, Atemfrequenz und der respiratorische Quotient. Von der weiteren Auswertung war aber nur die Sauerstoffaufnahme betroffen.

Bei der Beurteilung von Streuungen des Sauerstoffverbrauches ist beim FLEISCH'schen Metabographen zu beachten, daß diese nicht nur durch den Probanden verursacht werden, sondern vor allem auch apparativ bedingt sind, besonders bei Registrierung der Werte in kurzen Zeitabständen. Die Angabe von physiologisch bedingten Streuungen der Sauerstoffaufnahme in der Ergostase oder um die Regressionsgerade bei kontinuierlicher Belastungssteigerung ist somit nicht möglich. Das liegt daran, daß die Sauerstoffpumpe in zwei verschiedenen Koppelungsverhältnissen zu der der Kohlendioxydabsorption dienenden Kalilauge-Pumpe arbeitet, wobei die Zahl der Arbeitstakte von der Tiefe der In- und Expiration abhängt. Auf diese Weise wird die Sauerstoffaufnahme über die Zeit integriert zuverlässig gemessen, während bei Registrierung in kurzen Zeitabständen auf die Momentansauerstoffaufnahme bezogen fehlerhafte Werte resultieren, weil Fehlmessungen im einen Zeitabschnitt im folgenden Zeitabschnitt ausgeglichen werden, was eine erneute Momentan-Fehlmessung zur Folge hat.

Die Vorgabe der Belastung erfolgte mit dem Fahrradergometer. Für die beiden Versuche mit unmittelbarer Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit wurde ein elektromagnetisch gebremstes Fahrradergometer der Firma DARGATZ verwendet. Für Belastungen unter 90 Watt, wie es für den als dritten Arbeitsversuch durchgeführten LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER zutrifft, mußte aus technischen Gründen der mechanisch gebremste Ergostat nach

FLEISCH (9) benutzt werden. Um alle Belastungen mit derselben Drehzahl zur Erhaltung eines gleichbleibenden Wirkungsgrades durchführen zu können, betrug die Drehzahl der Pedale bei allen Versuchen 60 UpM. Die Arbeit erfolgte durchwegs im Sitzen.

Die Blutdruckmessung wurde zwar zur Sicherheit des Probanden durchgeführt und auch protokolliert, ging aber nicht in die weitere Auswertung ein.

2. Versuchsanordnungen

2.1. Ablauf des Versuches mit stufenweiser Belastungssteigerung

Der folgende Versuchsablauf gestaltet sich im Sinne des "Continuous multiple load test - CMLT" (4) und wurde in der Form durchgeführt, wie ihn WAHLUND im Jahre 1948 (40) zur Bestimmung der Physical Working Capacity 170 (PWC 170), heute Rate of Work 170 (W 170), beschrieb.

Im einzelnen ging es so vor sich, daß der Proband ausgeruht das Fahrradergometer (Firma DARGATZ) bestieg, an den FLEISCH'schen Metabographen angeschlossen wurde und schließlich gleichbleibende Ruhestoffwechselwerte abgewartet wurden. Dann erst wurde belastet, aus apparativ bedingten Gründen beginnend bei 90 Watt. In jeweils 6-minütigen Abständen wurde ohne Unterbrechung des Versuches die Belastung konstant um 30 Watt erhöht, bis der Proband in der Ergostase eine Pulsfrequenz von 170 Schlägen pro Minute überschritten hatte. Falls beispielsweise wegen lokaler Ermüdung in den Beinen schon vorher abgebrochen wurde, war der Versuch ungültig und wurde verworfen.

Da nach SIEBER (34) die beschriebene stufenweise Form der Belastungssteigerung im Vergleich zum MÜLLER'schen LPI-Versuch und

zum 10-minütigen Steady-state-Test die größte Aussagekraft besitzt, soll die Versuchsvariation nach WAHLUND (40) im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen als Vergleichsmaßstab für die Versuchsvariationen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung dienen. Wegen seiner langen Dauer kommt der WAHLUND'sche Versuch für routinediagnostische Zwecke ja ohnehin nicht in Frage.

2.2. Ablauf der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung

2.2.1. Unmittelbare Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit durch kontinuierliche Belastungssteigerung

Im Unterschied zum WAHLUND'schen Versuch wird bei der kontinuierlichen Belastungssteigerung keine Ergostase abgewartet. Die Kontinuität der Steigerung wird näherungsweise dadurch erfüllt, daß in kurzen Zeitabständen (eine Minute) und um nur geringe Beträge (10 Watt) gesteigert wird. Infolge der sehr langsam steigenden Belastung wird eine fast synchrone Adaptation des Stoffwechsels an die Belastungssteigerung erwartet. Aus diesem Grund hat diese Form der kontinuierlichen Belastungssteigerung überhaupt keine Gemeinsamkeiten mit dem Vita-maxima-Versuch (15, 16, 23, 36, 37), bei dem die Belastung ja ziemlich rasch ansteigt.

Die Vorbereitung erfolgte ebenso wie beim WAHLUND'schen Versuch. Begonnen wurde dann mit einer Belastung von 90 Watt. Auf dieser Stufe arbeiteten sich die Versuchspersonen drei Minuten ein, um sich an die anfangs hohe Belastungssteigerung von der Ruhe (0 Watt) auf 90 Watt adaptieren zu können. Schließlich wurde die Belastung minütlich um 10 Watt erhöht, bis eine Pulsfrequenz von 170 Schlägen pro Minute mit Sicherheit überschritten war. Ein vorzeitiger Abbruch war in keinem Fall nötig, zumal der Versuch relativ kurz dauert.

Die beschriebene Versuchsvariation entstand in Modifikation nach Empfehlungen von RUTENFRANZ (30, 31, 32, 33) zur Bestimmung der Rate of Work 170 (W 170). Dem Wesen nach handelt es sich um

einen LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER, welcher sich nur in höheren Leistungsbereichen als der Originalversuch abspielt.

In den Folgeabschnitten wird einfachheitshalber unter dem "Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung" der eben beschriebene Versuch verstanden, obwohl der im folgenden beschriebene Versuch nach E.A. MÜLLER durch dieselbe Form der Belastungssteigerung charakterisiert ist.

2.2.2. Bestimmung des LPI (Leistungspulsindex) nach E.A. MÜLLER durch kontinuierliche Belastungssteigerung

Die theoretischen Grundlagen zu diesem Versuch sind denen des Versuchs mit kontinuierlicher Belastungssteigerung, bei dem die W 170 direkt ermittelt wurde, analog. Der LPI (Leistungspulsindex) ist definiert als der Regressionskoeffizient zwischen Belastung und Pulsfrequenz bei minütlicher Belastungssteigerung von etwa 10 Watt, beginnend im Leerlauf und ansteigend bis zu einer Belastung von etwa 100 Watt (E.A. MÜLLER, 27). - Bei der Durchführung der Versuche wurden dieselben Vorbereitungen wie bei den anderen Versuchen getroffen. Allerdings erfolgte im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen die Arbeit am FLEISCH'schen Ergostaten (9); und es wurde auf die Messung der Atemgrößen verzichtet, so daß in die Auswertungen letztlich nur die Pulsfrequenz eingeht. Nach zweiminütiger Einarbeitung im Leerlauf fing die Belastung mit 10 Watt an und stieg minütlich um 10 Watt, bis 100 Watt erreicht waren. Der Versuch dauerte somit 12 Minuten. Im übrigen war die von E.A. MÜLLER (27) gegebene Versuchsbeschreibung verbindlich.

Bei allen Arbeitsversuchen fanden die 1961 und 1964 von mehreren Autoren gegebenen Standardisierungsvorschläge (24, 25, 26) zur Ergometrie Beachtung, so weit dies organisatorisch möglich war.

3. Berechnungen der Leistungsdaten und deren statistische Auswertung

Zur Erstellung der Auswertungsformeln und der statistischen Methoden wurden die unter den Nummern 10, 11 und 41 des Literaturverzeichnis angeführten Unterlagen verwendet. Die Signifikanzbeurteilung erfolgte an Hand der Tabellen in Nr. 11 des Literaturverzeichnis. Die statistischen Berechnungen sowie die Berechnung der Auswertungsdaten wurden auf dem Programmrechner der Firma OLIVETTI Typ P 203 durchgeführt.

Als Schranke, ob Unterschiede als signifikant zu bezeichnen sind, oder ob die zu vergleichenden Werte als nur zufällig verschieden angenommen werden können, wurde $p = 0,05$ (= 95 % Wahrscheinlichkeit) gewählt. Ein strengerer Maßstab ist im allgemeinen bei biologischen Versuchen nämlich nicht sinnvoll.

3.1. Berechnung der Leistungsdaten des einzelnen Probanden

Die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Leistung (Pulsfrequenz bzw. Sauerstoffaufnahme) wurden nach PEARSON-BRAVAIS bestimmt unter Verwendung folgender Formel:

$$r = \frac{\sum [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Um festzustellen, ob gefundene Korrelationskoeffizienten sich von einer mit Null angenommenen Korrelation signifikant unterscheiden, wurde die t-Funktion in folgender Form angewendet:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \cdot \sqrt{n-2} \quad (2)$$

Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Leistung (Pulsfrequenz bzw. Sauerstoffaufnahme) errechnen sich bei Regression von y auf x - wenn in der Abszisse die Belastungswerte und in der Ordinate die Leistungswerte stehen - nach folgender Formel:

$$b = \frac{\sum [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Der Leistungspulsindex (LPI) nach E.A. MÜLLER ist nichts anderes als der Regressionskoeffizient zwischen Belastung und

Pulsfrequenz, bezogen auf 10-Watt-Stufen.

Die Berechnung erfolgt also durch Multiplikation des entsprechenden Regressionskoeffizienten mit dem Faktor 10. (4)

Die Rate of Work 170 (W 170) wird beim Versuch nach WAHLUND durch Interpolation unter Verwendung folgender Formel bestimmt:

$$W\ 170 = L_s + \frac{\Delta L}{\Delta P} \cdot (170 - P_s) \quad (5)$$

Bei der Bestimmung der W 170 im Rahmen der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung erfolgt die Berechnung aus der Regressionsgeraden zwischen Belastung und Pulsfrequenz:

$$W\ 170 = L_m + \frac{170 - P_m}{b_P} \quad (6)$$

Die minütliche Sauerstoffaufnahme bei einer Belastungspulsfrequenz von 170/min ($V_{O_2}\ 170$) wird analog zur W 170 einmal durch Interpolation (Formel 7) und einmal aus der Regressionsgeraden zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme (Formel 8) ermittelt:

$$V_{O_2}\ 170 = V_s + \frac{\Delta V}{\Delta L} \cdot (W\ 170 - L_s) \quad (7)$$

$$V_{O_2}\ 170 = V_m + b_{O_2} \cdot (W\ 170 - L_m) \quad (8)$$

Die Berechnung des Standardfehlers der Regressionen zwischen Belastung und Leistung - also von Regressionen erster Art mit nur einer zufälligen Veränderlichen - erfolgte nach der Formel:

$$s_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2 - b^2 \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2}{n-2}} \quad (9)$$

Die zugehörigen Varianzen sind die Quadrate dieses so berechneten Standardfehlers. (10)

Die in Formel 9 zugrunde gelegte Standardabweichung verläuft parallel zur Regressionslinie. Da aber die Streuung meist nicht konstant ist, sondern von der Größe des Mittelwertes abhängt und damit mit zunehmendem Ordinatenwert (y-Werte) ebenfalls größer wird, wurde neben dem Standardfehler der Regressionen auch der Variabilitätskoeffizient bestimmt. Der Einfachheit halber wurde jeweils für den Mittelwertspunkt der Regressionslinie der Variabilitätskoeffizient ermittelt, der zu den Variabilitätskoeffizienten der einzelnen Punkte einer Regressionslinie nur geringfügige Differenzen aufweist.

$$v = \frac{100 \cdot s}{AM} \quad (11)$$

Unterschiede zwischen Korrelationskoeffizienten wurde mittels des folgenden Prüfquotienten auf ihre Signifikanz geprüft:

$$\text{Prüfquotient} = \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{\frac{1}{n_1 - 3} + \frac{1}{n_2 - 3}}} \quad (12)$$

Ist dabei der Prüfquotient kleiner als die tabellarisch ermittelbare Signifikanzschranke, so kann eine Gleichheit bei der Korrelationskoeffizienten genommen werden. Wie sich aus Formel 12 ergibt, erfolgte der Vergleich der Korrelationskoeffizienten über die z-Transformation. Dabei wurde die Korrelationsziffer z aus der Maßkorrelation r nach folgender Formel berechnet:

$$z = \text{Log. nat.} \sqrt{\frac{1+r}{1-r}} \quad (13)$$

Der Vergleich der Varianzen zweier Regressionen erfolgte ebenfalls mittels eines Prüfquotienten. Wenn dieser kleiner ist als die tabellarisch ermittelbare Signifikanzschranke, kann eine Gleichheit beider Varianzen angenommen werden. Die größere Varianz steht dabei im Zähler.

$$\text{Prüfquotient} = \frac{(S^2_{y,x})_1}{(S^2_{y,x})_2}; \text{ wobei die Freiheitsgrade } "n_1 - 2 \text{ und } n_2 - 2" \text{ sind} \quad (14)$$

4.2. Statistische Auswertung der nach den bisher angegebenen Formeln berechneten Leistungs- und Auswertungsdaten

Die arithmetischen Mittelwerte wurden berechnet nach der Formel:

$$AM = \frac{\sum x_i}{n} \quad (15)$$

Die Berechnung der zugehörigen Standardabweichungen erfolgte nach der Formel:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i^2) - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}{n-1}} \quad (16)$$

Die entsprechenden Variabilitätskoeffizienten errechnen sich in Analogie zur Formel 11.

Die Berechnung von Korrelationskoeffizienten und deren Überprüfung auf ihre signifikante Verschiedenheit von Null erfolgte analog zu den Formeln 1 und 2.

Um vergleichbare Größen bzw. Leistungsdaten, die aus verschiedenen Testverfahren ermittelt wurden, einander gegenüberzustellen, wurde jeweils der WILCOXON-Test für Paardifferenzen angesetzt. Dabei werden Wertpaare gebildet und deren Differenz bestimmt nach der Formel:

$$d_i = (x_i)_1 - (x_i)_2 \quad (17)$$

Im Falle der beschriebenen Versuche wurden beim Vergleich der Ergebnisse zweier Testverfahren jeweils die von einem Probanden gewonnenen Werte gepaart. Damit wurde der WILCOXON-Test für Paardifferenzen angesetzt. Die Prüfung, ob die Ergebnisse der zu vergleichenden Testverfahren sich signifikant unterscheiden oder als gleich betrachtet werden können, erfolgte mit dem nachstehenden Prüfquotienten:

$$z = \frac{|R - \frac{n(n+1)}{4}|}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}} \quad (18)$$

Der erhaltene z-Wert wurde dabei anhand seiner Position in der Standard-Normalverteilung (unter Zuhilfenahme entsprechender Tabellen) beurteilt, woraufhin die Entscheidung der Signi-

fikanzfrage erfolgen konnte.

Anhang zu "C - 3": Erläuterungen zu den oben angegebenen
Formeln

ad Formel 5 und 6: W_{170} = Rate of Work 170 (in Watt)

L_a = Belastung der Stufe, bei der der
Ergostasemittelwert 170 Pulse/min
noch nicht erreicht hat

P_a = Pulsfrequenz (Ergostasemittelwert)
bei der Belastungsstufe L_a

ΔL = Belastungsdifferenz von der Stufe
 L_a zur Stufe, bei der der Ergostase-
mittelwert 170 Pulse/min überschrit-
ten hat

ΔP = zu ΔL gehörige Pulsdifferenz (Dif-
ferenz der Ergostasemittelwerte)

L_m = Mittelwert der Belastung (Abszissen-
mittelwert) bei der linearen Regression
der Pulsfrequenz auf die Belastung

P_m = Mittelwert der Pulsfrequenz (Ordinaten-
mittelwert) bei der linearen Regression
der Pulsfrequenz auf die Belastung

b_P = Regressionskoeffizient zwischen Bela-
stung und Pulsfrequenz

ad Formel 7 und 8: V_a = Ergostasemittelwert der minütlichen
 O_2 -Aufnahme bei der Belastungsstufe L_a

ΔV = Differenz der O_2 -Aufnahme (Ergostase-
mittelwert), die zu ΔL gehört

V_m = Mittelwert der Sauerstoffaufnahme (Or-
dinatenmittelwert) bei der linearen
Regression der Sauerstoffaufnahme auf
die Belastung

b_{O_2} = Regressionskoeffizient zwischen Bela-
stung und Sauerstoffaufnahme

ad Formel 11: v = Variabilitätskoeffizient in %, s = Standardabweichung, AM = arithmetisches Mittel (hier: Mittelpunkt der Regressionslinie)

ad Formel 18: R = kleinere Rangsumme bei der Bildung getrennter Rangsummen der Rangzahlen mit positivem und negativem Vorzeichen

A N H A N G Z U C

Probanden und verwendete Geräte

Alter der Versuchspersonen

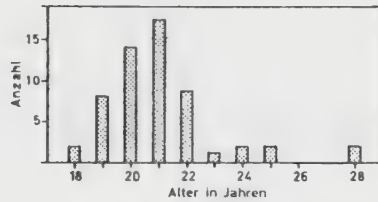


Abb. 1 des Anhangs zu C:

Das Alter der 60 Probanden betrug 18 bis 28 Jahre mit einem Mittel von 21,1 Jahren, einer Standardabweichung von 1,96 Jahren und einem Variabilitätskoeffizienten von 9,3 %. In der-Ordinate ist die Anzahl der Probanden aufgetragen.

Verwendete Geräte

Abb. 2 des Anhangs zu C:

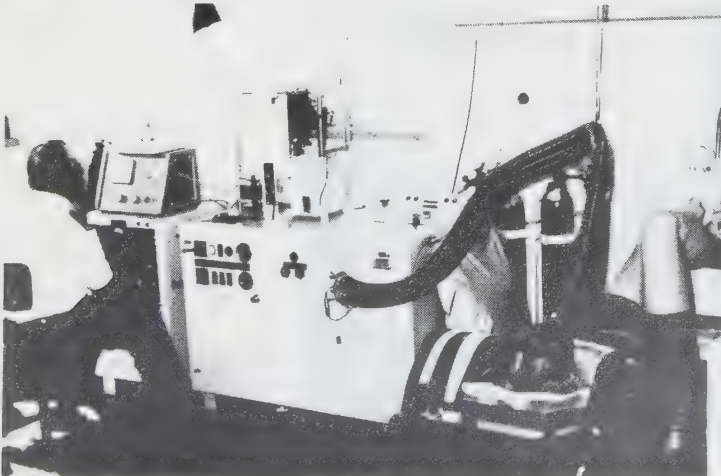


Abb. 3 des Anhangs zu C:

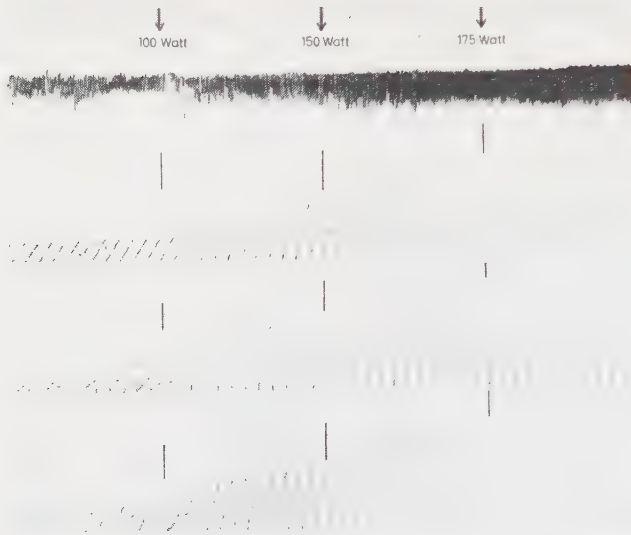
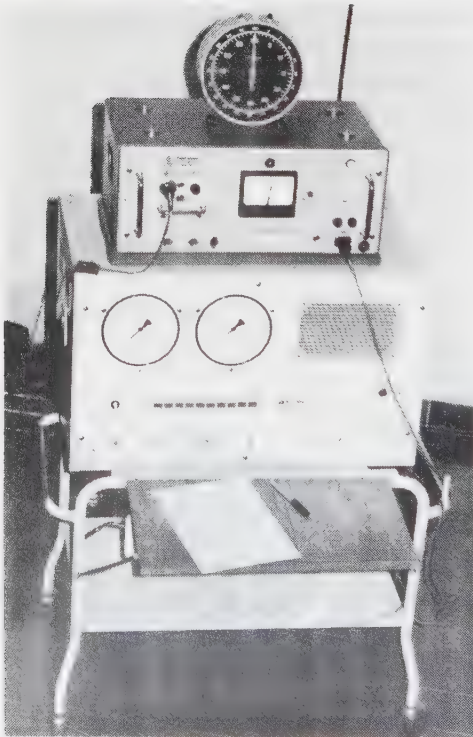


Abb. 1 des Anhangs zu C:



zu Abb. 2: Metabograph von A. Fleisch

zu Abb. 3: Originalkurvenbild aller auf dem Kymographen
des FLEISCH'schen Metabographen registrierten
Ventilationsgrößen (entnommen aus Nr. 28 des
Literaturverzeichnisses)

zu Abb. 4: Blutdruckmeßgerät "ELAG Typ BPM" und Pulsin-
tegrator der Firma Piesker

D. E R G E B N I S S E D E R E I G E N E N
 V E R S U C H E

1. Daten der Leistungsfähigkeit des Untersuchungsgutes

1.1. Ergebnisse des Versuches mit stufenweiser Belastungs-
steigerung (WAHLUND'scher Versuch)

Zunächst wurde die Adaptation der Pulsfrequenz an die stufenweise Belastungssteigerung an Hand der Ergostasebedingungen (28, 29) überprüft. Die Sauerstoffaufnahme konnte dabei nicht herangezogen werden, weil der Metabograph hier keine eindeutigen Aussagen zuläßt, wie es schon bei der Beschreibung der benutzten Geräte erläutert wurde. Wie aus der Tabelle und den Abbildungen 5 und 6 im Anhang zu D hervorgeht, überstieg die Pulsfrequenzzunahme selbst bei höheren Belastungsstufen im Mittel den Wert 3 Pulse/min kaum. Außerdem war die Ergostasebedingung für die Pulsfrequenz (Zunahme bis zum Ende der 6. Minute unter 8 Pulsen/min) wiederum auch bei höheren Belastungen im Mittel schon nach 2 bis 3 Minuten und nicht erst nach 4 Minuten erfüllt. Zwar liegen die zugehörigen Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten extrem hoch. Trotzdem kann man sagen, daß bei dem vorliegenden Probandengut im wesentlichen eine gute Adaptationsfähigkeit in allen Belastungsstufen besteht. Dazu muß gesondert angeführt werden, daß bei den in der Tabelle 1 dokumentierten Belastungsstufen ausnahmslos alle mit diesen Belastungen untersuchten Probanden die Ergostasebedingungen erfüllten, was aus der Tabelle nicht ersichtlich ist. Die Adaptation spricht für eine gute Eignung der ausgewählten Versuchspersonen zur experimentellen Klärung methodischer Fragen.

Die eigentlichen Daten der Leistungsfähigkeit der Probanden

beim Versuch nach WAHLUND finden sich in der Tabelle 2 und in den Abbildungen 7 bis 10 im Anhang zu D. Für jede einzelne Versuchsperson wurden die steigenden Belastungsstufen zu den daraus resultierenden Pulsfrequenz- und Sauerstoffaufnahmewerten (jeweils Ergostasemittelwerte, d. h. Mittelwerte der 4. bis 6. Minute) in Beziehung gesetzt. Dabei fiel auf, daß die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastungssteigerung und Pulsfrequenzzunahme bei etwa 6,7 % der Versuchsteilnehmer und die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastungssteigerung und Sauerstoffmehraufnahme sogar bei etwa 18,3 % der Versuchsteilnehmer statistisch nicht gesichert waren, wenn auch die Korrelationen numerisch sehr hoch lagen. Diese Tatsache spricht doch sehr dafür, daß nicht in allen Fällen bis zu einer belastungsinduzierten Pulsfrequenz von 170/min lineare Beziehungen zwischen Belastung und den Stoffwechselfparametern bestehen. - Die Rate of Work 170 (W 170) und die zugehörige Sauerstoffaufnahme (V_{O_2} 170) wurden nicht mit Hilfe der entsprechenden Regressionskoeffizienten, sondern durch lineare Interpolation aus der darunter- und darüberliegenden Belastungsstufe ermittelt. Dies ist beim WAHLUND'schen Versuch am genauesten, weil bei der Berechnung aus den entsprechenden Regressionsgeraden die geometrische Progression von Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme, die bei Untrainierten schon früh und vor 170 Pulsen/min einsetzt, zu wenig berücksichtigt würde. Die Ergebnisse der W 170 und V_{O_2} 170 sowie der Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz sowie Sauerstoffaufnahme werden an späterer Stelle im Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Versuchsvariationen dargestellt.

1.2. Ergebnisse der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung

1.2.1. Ergebnisse des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu einer Pulsfrequenz von 170 Pulsen/min

Bei diesem Versuch wurden neben den Korrelationen zwischen den mäßig steigenden Belastungswerten und den zugehörigen Werten der Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme zusätzlich die Korre-

lationen zwar zwischen denselben Größen bestimmt, wobei aber nur die Wertepaare Berücksichtigung fanden, deren Pulsfrequenzwerte etwa denen der Ergostasemittelwerte der Belastungsstufen des WAHLUND'schen Versuches entsprachen. Es handelt sich also im letzteren Falle um hinsichtlich der körperlichen Beanspruchung korrespondierende Meßpunkte zum WAHLUND'schen Versuch. Die W_{170} und die $V_{O_2 170}$ wurden im Gegensatz zum WAHLUND'schen Versuch aus den Mittelwerten aller Abszissen- und Ordinatenwerte (sog. Mittelwerts-Punkt) und den Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und den Ergebnissen der Pulsfrequenz oder Sauerstoffaufnahme berechnet. Eine Interpolation wäre hier sehr ungenau gewesen, weil sie nur auf zwei Einzelmeßwerten basieren würde, während beim WAHLUND'schen Versuch jeder der analogen Einzelwerte wiederum als Mittelwert auf drei Messungen in der Ergostase basiert. Somit stehen aus dem WAHLUND'schen Versuch und aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung die jeweils zuverlässigsten Werte der W_{170} und der $V_{O_2 170}$ gegenüber.

Beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung sind lediglich die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme nicht bei allen Probanden statistisch gesichert, wie aus der Tabelle 3 im Anhang zu D ersichtlich ist. Im einzelnen sind bei den Korrelationen unter Verwendung aller Wertepaare etwa 3,4 % der Versuchspersonen und bei den Korrelationen, für die nur die zum WAHLUND'schen Versuch korrespondierenden Meßpunkte berücksichtigt wurden, etwa 5,1 % der Versuchspersonen betroffen. Es fällt also die geringe Zahl der statistisch unsicheren Werte auf, wozu aber gesagt werden muß, daß bei den aus den zum WAHLUND'schen Versuch korrespondierenden Meßpunkten errechneten Korrelationskoeffizienten all jene Probanden unberücksichtigt blieben, bei den nur drei Meßpunkte und daher nur ein Freiheitsgrad zur Verfügung gestanden hätten. Hingegen wurden beim WAHLUND'schen Versuch solche an sich zu statistischer Unsicherheit neigenden Fälle sehr wohl mit ausgewertet, weil hier jedem Wert drei Werte der Ergostase zugrunde liegen, woraus eine größere Sicherheit der Werte resultiert. - Die trotz dieser Manipulationen beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung doch noch aufgetretenen Fälle mit statistisch unsicheren Korrelationen zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme, stehen sicher mindestens teilweise mit den bei den ver-

wendeten Geräten beschriebenen Besonderheiten der Sauerstoffmessung durch den Metabographen in Zusammenhang.

Die Ergebnisse der W 170 und V_{O_2} 170 sowie der zugehörigen Regressionskoeffizienten werden an späterer Stelle im Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Versuchsvariationen dargestellt.

1.2.2. Ergebnisse des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung in niedrigen Belastungsbereichen (LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER)

Beim LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER erfolgte die Auswertung infolge der Wesensverwandtschaft ebenso wie beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu einer Pulsfrequenz von 170/min. Lediglich die beim LPI-Versuch nicht gemessene Sauerstoffaufnahme entfiel. Die Leistungspulsindices (LPI) nach E.A. MÜLLER wurden aus den Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz berechnet, indem die Pulsfrequenzen auf 10-Watt-Stufen bezogen wurden.

Wie aus dem Kommentar zur Tabelle 4 im Anhang zu D hervorgeht, in der die Auswertungsdaten des LPI-Versuches dokumentiert sind, waren die Korrelationen zwischen Belastung und Pulsfrequenz ausnahmslos alle statistisch gesichert. Dies war auch bei der kontinuierlichen Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min der Fall. Beim LPI-Versuch wäre aber selbst bei einem $p \leq 0,001$ ($\hat{=}$ 99,9 % Wahrscheinlichkeit) als Signifikanzmaßstab noch jeder einzelne Korrelationskoeffizient signifikant von Null verschieden gewesen.

Die Ergebnisse der Regressionskoeffizienten und der W 170 werden im folgenden im Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Versuchsvariationen dargestellt.

1.3. Statistische Analyse der Daten der Leistungsfähigkeit - eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

Die in den Tabellen 2, 3 und 4 im Anhang zu D dokumentierten Auswertungsdaten aus dem WAHLUND'schen Versuch und aus den beiden

Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung sind in den Abbildungen 7 bis 10 im Anhang zu D statistisch ausgewertet und graphisch dargestellt. Es handelt sich dabei um die Mittelwerte der Leistungsdaten der einzelnen Versuche und Versuchsteilnehmer einschließlich Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten.

Wie man aus den Abbildungen 7 bis 10 sehen kann, liegen die Ergebnisse der die Leistungsfähigkeit charakterisierenden Größen (Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme, W_{170} , $V_{O_2 170}$) so, daß beim LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER die besten und beim WAHLUND'schen Versuch die schlechtesten Leistungsergebnisse resultieren, während sie beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min dazwischen liegen. Inwieweit die Unterschiede statistisch gesichert sind, wird jedoch an späterer Stelle untersucht. Die Abbildungen 7 bis 10 sollen nur die Gesamtsituation veranschaulichen.

2. Daten zu den Vergleichen von Aussagekraft und Genauigkeiten zwischen den einzelnen Versuchen

2.1. Daten zur Beurteilung der Aussagekraft der einzelnen Versuche

Nach SIEBER (34), der einen Vergleich zwischen drei Versuchsvariationen (stufenweise Belastungssteigerung mit Ergostase, minütliche Belastungssteigerung, Steady-state-Belastung) angestellt hat, ergibt die Versuchsvariation mit stufenweiser Belastungssteigerung, die in Analogie zum WAHLUND'schen Versuch zu setzen wäre, die Werte mit der größten Aussagekraft. Aus diesem Grunde wurden die Ergebnisse der beiden Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung an Hand derer des WAHLUND'schen Versuches überprüft und untereinander verglichen.

Die Ergebnisse der Überprüfung vergleichbarer Größen sind in der Tabelle 5 im Anhang zu D zusammengefaßt. Man erkennt, daß, abgesehen von den Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme und der V_{O_2} 170, die verglichenen Größen immer einerseits miteinander signifikant korrelieren und sich andererseits in ihren Werten immer signifikant unterscheiden. Dies besagt, daß die schon bei der Zusammenfassung der Auswertungsdaten festgestellte Verschiedenheit der aus den einzelnen Versuchen resultierenden Leistungsdaten kein Zufall, sondern statistisch gesichert ist. Diese verschiedenen Ergebnisse stehen jedoch in innerem Zusammenhang und wären nomogramatisch ineinander umrechenbar. - Weiterhin fällt in der Tabelle 5 auf, daß die Korrelationskoeffizienten beim Vergleich der Werte für die W 170 und für die V_{O_2} 170 durchwegs höher liegen als beim Vergleich der entsprechenden Regressionskoeffizienten.

Aus den angeführten Tatsachen ergibt sich, daß die Aussagekraft, welche eine möglichst gute Übereinstimmung mit den physiologisch wahren Werten bedeutet, bei beiden Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung sich signifikant von der des WAHLUND'schen Versuches unterscheidet. Da aber, wie schon erwähnt, die Aussagekraft des letzteren Versuches am größten ist, folgt für die kontinuierliche Belastungssteigerung, daß die geringere Aussagekraft ihrer Ergebnisse noch dazu statistisch signifikant ist. - Schließlich ist der Versuch nach E.A. MÜLLER, aus dem die praemaximale Leistung nur rechnerisch extrapoliert wird, wegen der signifikanten Unterschiede der Leistungsdaten dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis 170 Pulse/min, bei dem die praemaximale Leistung also unmittelbar gemessen wird, hinsichtlich der Aussagekraft unterlegen.

Im einzelnen zeigten sich beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Versuchsvariationen die im folgenden beschriebenen Verhältnisse.

2.1.1. Überprüfung der Leistungsdaten des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis 170 Pulse/min an Hand der Leistungsdaten des WAHLUND'schen Versuches

Beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min resultieren bei den vergleichbaren Größen bessere Leistungen als beim WAHLUND'schen Versuch. Hierzu ergaben sich im einzelnen folgende Tatsachen.

- (1) Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz korrelieren bei paarweiser Gegenüberstellung im Vergleich zwischen beiden Versuchen signifikant miteinander ($r = 0,499$) und sind andererseits im WILCOXON-Test für Paardifferenzen beim WAHLUND'schen Versuch signifikant höher. Somit ist der Pulsfrequenzanstieg beim WAHLUND'schen Versuch bei gleichen Belastungsdifferenzen größer als beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung.
- (2) Die Werte für die W 170 korrelieren bei paarweiser Gegenüberstellung signifikant miteinander ($r = 0,752$) und liegen im WILCOXON-Test für Paardifferenzen beim WAHLUND'schen Versuch statistisch gesichert niedriger.
- (3) Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme aus beiden Versuchen zeigen praktisch keinerlei Korrelationen bei ihrer paarweisen Gegenüberstellung. Der Korrelationskoeffizient der Regressionskoeffizienten-Paare liegt absolut unter 0,1 und hat überdies ein negatives Vorzeichen ($r = - 0,067$). Im WILCOXON-Test für Paardifferenzen sind die genannten Regressionskoeffizienten beim WAHLUND'schen Versuch signifikant höher, was einen geringeren Anstieg der Sauerstoffaufnahme bei gleichen Belastungsdifferenzen im Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung bedeutet.
- (4) Die V_{O_2} 170 zeigt bei paarweiser Gegenüberstellung ihrer Werte aus beiden Versuchen eine signifikante Korrelation ($r = 0,729$) und liegt im WILCOXON-Test für Paardifferenzen zwar in der Regel beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung höher, ohne daß dabei aber die Unterschiede zu den Ergebnissen des WAHLUND'schen Versuches signifikant wären, so daß die Annahme einer rein zufälligen Abweichung weitgehend Gültigkeit beanspruchen kann. Diese Tatsache und die überraschend hohe Korrelation zwischen den Wertepaaren der V_{O_2} 170 stimmen gut mit den Beobachtungen anderer Autoren überein. So ist nach HOLLMANN, VALENTIN, VENRATH und BONNEKOH (15) der Maximale Sauerstoffpuls, zu dem ja die V_{O_2} 170 eine Analoggröße ist, un-

abhängig von der Versuchsvariation.

2.1.2. Überprüfung der Leistungsdaten des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER an Hand der Leistungsdaten des WAHLUND'- schen Versuches

Bei der Überprüfung der Leistungsdaten des MÜLLER'schen LPI-Versuches an Hand der Leistungsdaten des WAHLUND'schen Versuches hinsichtlich der Aussagekraft resultieren beim LPI-Versuch bessere Leistungen als beim WAHLUND'schen Versuch. Hierzu ergaben sich im einzelnen folgende Tatsachen.

- (1) Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz korrelieren bei paarweiser Gegenüberstellung signifikant miteinander ($r = 0,476$) und liegen im WILCOXON-Test für Paar-Differenzen beim WAHLUND'schen Versuch statistisch gesichert höher, so daß also der Pulsfrequenzanstieg beim MÜLLER'schen LPI-Versuch flacher verläuft als beim Versuch nach WAHLUND.
- (2) Die Werte der W 170 aus beiden Versuchen korrelieren bei paarweiser Gegenüberstellung signifikant miteinander ($r = 0,691$) und liegen im WILCOXON-Test für Paardifferenzen beim LPI-Versuch signifikant höher.

2.1.3. Überprüfung der Leistungsdaten des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER an Hand der Leistungsdaten des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min

Beide Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung unterscheiden sich lediglich im Belastungsniveau. Damit erhebt sich die Frage, ob durch diesen Unterschied bei vergleichbaren Leistungsgrößen verschiedene Ergebnisse resultieren. Wie schon erwähnt, ist allerdings die Aussagekraft der Versuchsvariation von 90 Watt bis 170 Pulse/min infolge der unmittelbaren Messungen im praemaximalen Leistungsbereich von vorneherein größer. Im einzelnen ergaben sich folgende Tatsachen.

- (1) Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz korrelieren bei paarweiser Gegenüberstellung signifikant miteinander ($r = 0,548$) und liegen im WILCOXON-Test für Paardifferenzen beim Versuch von 90 Watt bis 170 Pulse/min statistisch gesichert höher, so daß also der

Pulsfrequenzanstieg beim MÜLLER'schen LPI-Versuch flacher verläuft.

- (2) Die Werte der W 170 aus beiden Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung korrelieren bei paarweiser Gegenüberstellung signifikant miteinander ($r = 0,619$) und liegen im WILCOXON-Test für Paardifferenzen beim LPI-Versuch signifikant höher.

Durch die genannten Tatsachen ist statistisch gesichert, daß von den beiden Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung der Versuch von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min (im Vergleich zum LPI-Versuch) die größere Aussagekraft besitzt.

2.2. Daten zur Beurteilung der Genauigkeit der einzelnen Versuche

Während der Vergleich der Aussagekraft der einzelnen Versuchsvariationen in einem Vergleich der ermittelten Größen der Leistungsfähigkeit untereinander bestand, soll im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen die Genauigkeit eines Versuches als der Grad der Adaptation der Kreislauf- und Atemgrößen an die vorgegebene Belastung definiert sein. Die so verstandene Genauigkeit wurde an Hand der Regressionsgeraden (zwischen der steigenden Belastung einerseits und der Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme andererseits), welche für alle drei Versuche bei jedem Probanden berechnet wurden, überprüft. Liegen die tatsächlichen Einzelmeßwerte weit verstreut um die lineare Regression, dann sind Adaptation und somit die Genauigkeit schlecht. Man kann also sagen, daß die Genauigkeit umso größer ist, je enger einerseits die Korrelationen zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme und je kleiner andererseits Varianz, Standardabweichung und Variabilitätskoeffizient der Ordinatewerte (Pulsfrequenz, Sauerstoffaufnahme) um die Regressionsgerade sind.

Während beim Versuch nach WAHLUND eine gewisse Adaptation in Form der Ergostase von vorneherein gegeben ist, ist die Adaptation bei beiden Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung zunächst fraglich. Wegen der minimalen

Belastungssteigerung in der Zeiteinheit könnte man rein theoretisch gesehen allerdings eine nahezu synchrone Adaptation erwarten, die so gut ist, daß sie der des WAHLUND'schen Versuches nicht nachsteht. Dieser Sachverhalt wurde im folgenden im Einzelfall überprüft.

Der Vergleich der Genauigkeiten der Versuche geschah in Form eines Vergleichs der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme, welche aus den mit jedem Probanden durchgeführten Versuchen berechnet worden waren. Für den Vergleich der beiden Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung wurden zusätzlich noch die Varianzen, Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten einander gegenübergestellt.

2.2.1. Überprüfung der Genauigkeit des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis 170 Pulse/min an Hand des Versuches nach WAHLUND

In den Spalten 1 bis 4 der Tabelle 6 im Anhang zu D werden die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung an Hand der analogen Korrelationen beim WAHLUND'schen Versuch überprüft. Im einzelnen ergeben sich dabei folgende Tatsachen.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz sind beim Versuch nach WAHLUND in drei von 40 verglichenen Fällen signifikant höher, während beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung nur in einem der 40 Fälle die Korrelation signifikant höher ist. In den verbleibenden 36 der 40 Fälle kann beim Vergleich der Korrelationskoeffizienten die Null-Hypothese nicht abgelehnt werden, so daß die Annahme der nur zufälligen Abweichung weithin Gültigkeit beanspruchen kann. In diesen 36 Fällen können also keine gesicherten Unterschiede in der Versuchsgenauigkeit festgestellt werden. - Stellt man aber lediglich die Korrelationskoeffizienten aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung, welche nur aus den zum WAHLUND'schen Versuch korrespondierenden Meßpunkten berechnet und schon des öfteren erwähnt wurden, den entsprechenden Korrelationsko-

effizienten des WAHLUND'schen Versuches gegenüber, dann ist bei den angeführten 40 Vergleichsfällen nur in einem Fall der genannte Korrelationskoeffizient beim WAHLUND'schen Versuch signifikant höher, während in den übrigen 39 Fällen die Abweichungen unsicher und ohne Aussagekraft sind.

Weiterhin geht aus den Spalten 1 bis 4 der Tabelle 6 im Anhang zu D hervor, daß die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme beim Versuch nach WAHLUND in neun von 39 verglichenen Fällen signifikant höher sind, während beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung in keinem der Fälle die genannte Korrelation signifikant höher ist. In 23,1 % der Fälle ist also die Genauigkeit hinsichtlich der Sauerstoffaufnahme beim WAHLUND'schen Versuch statistisch gesichert größer als beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung, während für den Rest der 39 Fälle die Abweichungen der Korrelationen weithin als zufällig gelten müssen. - Vergleicht man hingegen nur die Korrelationskoeffizienten, die sich aus den korrespondierenden Wertepaaren (Belastung, Sauerstoffaufnahme) beider Versuche errechnen, dann kann bei ebenfalls 39 Vergleichsfällen in keinem Fall ein statistisch gesicherter Unterschied nachgewiesen werden, und somit in allen 39 Fällen die Annahme einer nur zufälligen Abweichung in der Genauigkeit weithin Gültigkeit beanspruchen.

Zusammenfassend kann man zu den Spalten 1 bis 4 der Tabelle 6 sagen, daß (je nach Spalte) zwischen 77 % bis 100 % der Korrelationskoeffizienten (zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme) in der paarweisen Gegenüberstellung der beiden verglichenen Versuche voneinander nicht signifikant abweichen. Somit kann die Annahme der nur zufälligen Unterschiede in der Genauigkeit des WAHLUND'schen Versuches und des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min in der weitaus überwiegenden Zahl der Fälle als richtig bezeichnet werden.

Auf den Vergleich der Genauigkeit an Hand der Varianzanalyse der Meßwerte zur Regressionsgeraden wurde verzichtet, da bei der geringen Anzahl von Wertepaaren beim WAHLUND'schen Versuch eine Angabe der Varianzen wenig sinnvoll erschien.

2.2.2. Überprüfung der Genauigkeit des MÜLLER'schen LPI-Versuches an Hand des Versuches nach WAHLUND

In der Spalte 5 der Tabelle 6 im Anhang zu D werden die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz aus dem Versuch nach WAHLUND einerseits und aus dem LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER andererseits paarweise miteinander verglichen. Auf eine Varianzanalyse der Meßwerte zur Regressionsgeraden (zwischen Belastung und Pulsfrequenz) wurde wiederum wegen der geringen Zahl von Wertepaaren des WAHLUND'schen Versuches verzichtet. Von insgesamt 34 verglichenen Paaren von Korrelationskoeffizienten sind nur in zwei Fällen, das sind 5,9 % der Fälle, die Korrelationen zwischen Belastung und Pulsfrequenz beim WAHLUND'schen Versuch signifikant höher als beim LPI-Versuch. In den übrigen 94,1 % der Fälle sind die Abweichungen statistisch nicht gesichert. Dies bedeutet, daß in etwa 94 % der verglichenen Fälle Unterschiede in der Genauigkeit zwischen den beiden genannten Versuchen als weithin zufällig betrachtet werden können.

2.2.3. Vergleich der Genauigkeit des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER und des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min

Während beim Vergleich der Aussagekraft der beiden Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von vorneherein der Versuch mit direkten Messungen im praemaximalen Leistungsbereich dem LPI-Versuch überlegen war, und letzterer an ersterem überprüft wurde, ist beim Vergleich der Genauigkeit keinem der beiden Versuche von vorneherein der Vorzug zu geben. Da sich beide Versuche nur in der Belastungshöhe unterscheiden, soll geklärt werden, inwieweit dies Einfluß auf die Genauigkeit hat. Wegen der Wichtigkeit dieses Problems wurden nicht nur die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz paarweise miteinander verglichen, sondern auch die Varianzen, Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten der Pulsfrequenzwerte um die Regressionsgerade paarweise einander gegenübergestellt.

In der Spalte 6 der Tabelle 6 und in der Tabelle 7 im Anhang zu D sind die Ergebnisse aus dem Genauigkeitsvergleich beider

Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung dokumentiert.

Beim paarweisen Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz (Spalte 6 der Tabelle 6) ergab sich ein signifikanter Unterschied nur in drei von insgesamt 49 Vergleichsfällen. Dies sind 6,1 % der Fälle. In den übrigen etwa 94 % der Fälle konnten die Genauigkeitsunterschiede statistisch nicht gesichert werden. Von den drei Fällen mit signifikant verschiedenen Korrelationen ist in zwei Fällen die Korrelation zwischen Belastung und Pulsfrequenz beim LPI-Versuch und in einem Fall beim Versuch von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min höher. - Ganz andere Aspekte ergeben sich beim Vergleich der Genauigkeiten an Hand der Gegenüberstellung der Varianzen der Pulsfrequenzwerte zur Regressionsgeraden zwischen Belastung und Pulsfrequenz (Tabelle 7). Hier liegen 50 Vergleichsfälle von denselben Probanden und aus denselben Versuchen vor. Bei 23 Vergleichsfällen, das sind 46 % der 50 Fälle, waren in 21 Fällen beim Versuch von 90 Watt bis 170 Pulse/min und nur in zwei Fällen beim LPI-Versuch die genannten Varianzen signifikant höher. Die verbleibenden 54 % der 50 Vergleichsfälle zeigen in den Varianzen, Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten nur statistisch unsichere Unterschiede, die weitgehend als zufällig betrachtet werden können. Zu bemerken wäre noch, daß von den Unterschieden in der Genauigkeit, betrachtet an Hand der Varianzanalyse, Probanden aller Leistungsklassen betroffen sind, und somit keine Beziehung zur Leistungsfähigkeit besteht. - Die Varianzanalyse ergab also in 42 % der Fälle eine signifikant größere Genauigkeit für den LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER.

A N H A N G Z U D

Daten der Leistungsfähigkeit des Untersuchungsgutes

Ergebnisse des Versuches mit stufenweiser Belastungssteigerung
(WAHLUND'scher Versuch)

In der folgenden Tabelle 1 steht in der

- Spalte 1: die Anzahl der Teilnehmer an der jeweiligen Belastungsstufe
- Spalte 2: der Prozentsatz der jeweiligen Teilnehmerzahl an der Gesamtzahl der Teilnehmer (60 Probanden)
- Spalte 3: das arithmetische Mittel der Pulsfrequenzzunahmen von der 4. bis zur 6. Minute
- Spalte 4: die zugehörige Standardabweichung
- Spalte 5: der zugehörige Variabilitätskoeffizient
- Spalte 6: das arithmetische Mittel des Zeitbedarfs in Minuten zur Erfüllung der Ergostasebedingung für die Pulsfrequenz, was in der Regel bereits vor der 4. Minute geschah
- Spalte 7: die zugehörige Standardabweichung
- Spalte 8: der zugehörige Variabilitätskoeffizient

In den auf die Tabelle 1 folgenden Abbildungen 1 und 2 des Anhangs zu D sind die in der Tabelle 1 aufgeführten Werte zur Adaptation der Pulsfrequenz an die Belastung graphisch dargestellt.

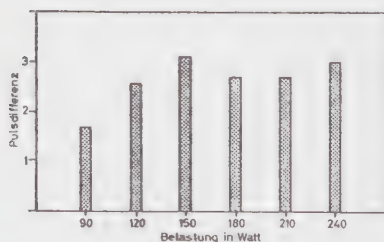
Tabelle 1: Zur Adaption der Pulsfrequenz an die Belastung

Belastung	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6	Spalte 7	Spalte 8
90 Watt	60	100,0%	1,67	1,99	119,8%	1,52	0,95	62,5%
120 Watt	60	100,0%	2,60	2,26	87,1%	2,17	1,09	50,4%
150 Watt	60	100,0%	3,10	2,48	80,1%	2,50	1,05	42,0%
180 Watt	47	78,3%	3,19	2,37	74,4%	2,62	1,07	40,9%
210 Watt	15	25,0%	2,73	1,87	68,4%	2,81	1,05	37,2%
240 Watt	3	5,0%	3,0	-	-	2,00	-	-

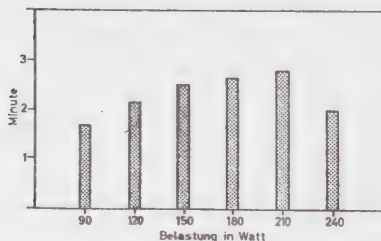
(Wegen der geringen Teilnehmerzahl von nur 3 Probanden erfolgte bei der Belastungsstufe 240 Watt keine statistische Auswertung.)

Abb.1 und 2 des Anhangs zu D:

Darstellung der Spalten 3 und 6 im Diagramm



Das Diagramm zeigt die durchschnittliche Zunahme der Pulsschläge/min von der 4. bis zur 6. Minute bei den einzelnen Belastungsstufen.



Das Diagramm zeigt, nach welcher Minute im Durchschnitt die Ergostasebedingung für die Pulsfrequenz (Zunahme bis zur 6. Minute unter 8 Schlägen/min) bei den einzelnen Belastungsstufen erfüllt war.

Die folgende Tabelle 2 zeigt die Korrelationskoeffizienten (nach PEARSON-BRAVAIS) und Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz bzw. Sauerstoffaufnahme und außerdem die W_{170} bzw. $\dot{V}O_2$ 170.

Spalte 1: Korrelationskoeffizient (PEARSON-BRAVAIS) zum Verhältnis zwischen Belastung und Pulsfrequenz

Spalte 2: Regressionskoeffizient zum Verhältnis zwischen Belastung und Pulsfrequenz

Spalte 3: Rate of Work 170 (W_{170}) in Watt, berechnet durch Interpolation

Spalte 4: Korrelationskoeffizient (PEARSON-BRAVAIS) zum Verhältnis zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme (in ml $\dot{O}_2$ /min)

Spalte 5: Regressionskoeffizient zum Verhältnis zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme (in ml $\dot{O}_2$ /min)

Spalte 6: Sauerstoffaufnahme bei einer belastungsinduzierten Pulsfrequenz von 170 ($\dot{V}O_2$ 170) in ml $\dot{O}_2$ /min, berechnet durch Interpolation

(Als Belastungswerte gelten die Belastungen der jeweils 6-minütigen Belastungsstufen, bei den Stoffwechselfparametern - Pulsfrequenz, Sauerstoffaufnahme - wurden jeweils die Mittelwerte der Werte von der 4. bis zur 6. Minute eingetragen.)

Die in der Tabelle aufgeführten Korrelationskoeffizienten sind nicht alle signifikant von Null verschieden. Dies gilt sowohl für die Korrelationskoeffizienten der Spalte 1 als auch für die Korrelationskoeffizienten der Spalte 4. Dabei sind von den Korrelationskoeffizienten der Spalte 1 die der laufenden Nummern 15, 16, 36 und 47, von den Korrelationskoeffizienten der Spalte 4 die der laufenden Nummern 15, 20, 21, 24, 32, 37, 40, 41, 42, 46 und 47 nicht signifikant von Null verschieden, wenn auch ihre Werte sehr hoch liegen.

Anhang zu D IV-

Tabelle 2: Zusammenfassung der aus dem Versuch nach WAHLUND ermittelten Daten der Leistungsfähigkeit

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6
1	0,995	0,598	192	0,999	10,925	2770
2	0,999	0,792	133	0,998	14,578	1930
3	0,999	0,865	159	0,999	13,838	2670
4	0,999	0,836	144	0,999	17,801	2220
5	0,988	0,738	172	0,998	17,803	2740
6	0,994	0,551	187	0,974	15,843	2930
7	-	1,040	119	-	10,800	1569
8	0,999	0,615	201	0,986	14,428	3077
9	0,997	0,792	161	0,999	15,885	2741
10	0,977	0,540	158	0,996	13,889	2358
11	0,999	0,647	159	0,996	15,462	2362
12	0,996	0,683	180	0,992	23,766	3480
13	0,999	1,057	143	0,999	15,930	2145
14	0,997	0,692	165	0,998	15,373	2595
15	0,994	0,952	142	0,995	16,862	2335
16	0,964	0,735	171	0,946	21,240	3803
17	0,999	0,647	189	0,992	14,879	2850
18	0,998	0,567	197	0,999	14,415	3048
19	0,999	0,680	202	0,996	13,688	2938
20	0,980	0,667	148	0,994	14,000	2187
21	0,999	0,750	150	0,991	14,000	2250
22	0,999	0,713	167	0,986	13,384	2492
23	0,999	0,737	154	0,990	17,715	2414
24	0,992	0,995	140	0,992	9,603	1987
25	0,997	0,464	218	0,999	13,586	3109
26	0,999	0,764	128	0,999	14,919	1861
27	0,998	0,901	158	0,999	14,729	2477
28	0,999	0,650	150	0,999	18,667	2500
29	0,995	0,682	163	0,997	15,548	2420
30	0,997	0,697	140	0,999	17,234	2157

Anhang zu D -V-

Tabelle 2 - Blatt 2 -

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6
31	0,999	0,658	136	0,999	15,602	2305
32	0,997	0,664	143	0,972	12,285	2389
33	0,985	0,600	180	0,989	17,267	3060
34	0,997	0,537	180	0,995	14,900	2850
35	0,998	0,530	210	0,999	15,867	3380
36	0,981	0,832	142	0,998	13,068	2263
37	0,998	0,677	158	0,912	11,920	2333
38	0,996	0,799	176	0,999	14,860	2659
39	0,999	0,652	174	0,989	14,643	2666
40	0,997	0,483	201	0,923	14,660	3057
41	0,987	0,794	164	0,935	18,748	3019
42	0,987	0,794	177	0,935	18,748	2797
43	0,993	0,822	169	0,994	15,030	2664
44	0,999	0,593	180	0,998	13,867	2690
45	0,989	0,557	210	0,997	14,967	3370
46	0,999	1,045	132	0,986	18,564	2272
47	0,993	0,799	142	0,995	13,192	2112
48	0,992	0,669	169	0,997	13,371	2490
49	0,997	0,565	174	0,989	14,906	2700
50	0,988	0,526	196	0,999	13,776	3057
51	0,999	0,612	174	0,994	15,557	2700
52	0,999	0,673	136	0,998	13,583	2111
53	0,999	0,562	199	0,998	16,054	3318
54	0,994	0,588	170	0,994	15,173	2563
55	0,999	0,606	158	0,980	18,964	2854
56	0,997	1,228	126	0,999	18,414	1920
57	0,989	0,374	189	0,994	12,841	3002
58	0,999	0,600	130	0,999	15,233	2790
59	0,999	0,935	130	0,998	17,288	2053
60	0,991	0,620	174	0,999	14,593	2634

Ergebnisse der Versuche mit kontinuierlicher Belastungs-
steigerung

Ergebnisse des Versuches mit kontinuierlicher Belastungs-
steigerung von 90 Watt bis zu einer Pulsfrequenz von 170
Pulsen/min

Die Ergebnisse der Versuchsvariation mit kontinuierlich stei-
gender Belastung bis zur Erreichung einer Pulsfrequenz von
170/min sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt.
Analog zur Tabelle 2 sind auch hier Korrelations- und Re-
gressionskoeffizienten zwischen Belastung und Leistung so-
wie die W 170 und die V_{O_2} 170 aufgeführt.

- Spalte 1: Korrelationskoeffizient (PEARSON-BRAVAIS) zum
Verhältnis zwischen Belastung und Pulsfrequenz
unter Berücksichtigung aller minütlich ermittel-
ten Werte
- Spalte 2: Korrelationskoeffizient (PEARSON-BRAVAIS) zum Ver-
hältnis zwischen Belastung und Pulsfrequenz, wobei
aber nur die Meßwerte ausgewählt wurden, deren
Pulsfrequenzwerte etwa den Ergostasemittelwerten
des Versuches nach WAHLUND beim gleichen Proban-
den entsprechen
- Spalte 3: Regressionskoeffizient zum Verhältnis zwischen Be-
lastung und Pulsfrequenz unter Berücksichtigung der
Minutenwerte
- Spalte 4: Rate of Work 170 (W 170) in Watt, berechnet über
die lineare Regression zwischen Belastung und Puls-
frequenz
- Spalte 5: Korrelationskoeffizient (PEARSON-BRAVAIS) zum Ver-
hältnis zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme
in Analogie zur Spalte 1
- Spalte 6: Korrelationskoeffizient (PEARSON-BRAVAIS) zum Ver-
hältnis zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme
in Analogie zur Spalte 2
- Spalte 7: Regressionskoeffizient zwischen Belastung und
Sauerstoffaufnahme unter Berücksichtigung aller
Minutenwerte

Spalte 8: Sauerstoffaufnahme bei einer belastungsinduzierten Pulsfrequenz von 170 (V_{O_2} 170) in ml O_2 /min, berechnet über die lineare Regression zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme

Die in der Tabelle aufgeführten Korrelationskoeffizienten sind nicht alle statistisch gesichert. Während die Korrelationskoeffizienten der Spalten 1 und 2 ausnahmslos signifikant von Null verschieden sind, ist dies bei denen der Spalte 6 bei den Nummern 27 und 55 nicht der Fall.

Anhang zu D -VIII-

Tabelle 3: Zusammenfassung der aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min ermittelten Daten der Leistungsfähigkeit

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6	Spalte 7	Spalte 8
1	0,979	0,979	0,513	212	0,927	0,979	12,133	2015
2	0,994	-	0,806	134	0,947	-	7,700	1714
3	0,981	0,995	0,514	196	0,901	0,987	8,809	2633
4	0,991	-	0,681	163	0,961	-	12,048	2470
5	0,988	0,981	0,584	195	0,962	0,988	13,795	2757
6	0,987	0,988	0,508	201	0,964	0,994	13,371	2401
7	0,972	-	0,560	134	0,918	-	8,900	2151
8	0,990	0,997	0,517	231	0,952	0,932	12,116	3001
9	0,984	0,991	0,542	171	0,819	0,998	10,500	2399
10	0,988	0,991	0,599	175	0,930	0,955	16,459	2515
11	0,958	0,997	0,370	203	0,978	0,986	12,808	2699
12	0,996	0,996	0,518	201	0,962	0,995	13,084	2850
13	0,984	-	0,800	167	0,974	-	12,833	2198
14	0,985	0,986	0,481	203	0,987	0,988	13,280	2769
15	0,982	-	0,572	181	0,974	-	15,033	2654
16	0,995	0,998	0,547	220	0,968	0,973	13,395	3239
17	0,990	0,995	0,425	227	0,941	0,985	11,004	3047
18	0,990	0,995	0,356	204	0,954	0,999	11,558	2748
19	0,974	0,993	0,484	226	0,945	0,943	13,201	3003
20	0,990	-	0,550	159	0,968	-	11,067	2108
21	0,985	-	0,860	137	0,967	-	19,543	2057
22	0,990	0,990	0,535	198	0,979	0,996	16,196	2915
23	0,988	0,990	0,390	217	-	-	-	-
24	0,997	-	0,633	178	0,969	-	10,298	2218
25	0,996	0,998	0,424	209	0,950	0,986	11,571	2716
26	0,998	-	0,749	139	0,839	-	10,400	1838
27	0,964	0,993	0,721	167	0,927	0,844	13,729	2452
28	0,996	-	0,663	181	0,967	-	14,400	2538
29	0,957	0,980	0,537	160	0,936	0,998	12,516	2237
30	0,988	-	0,604	148	0,806	-	10,929	2117

Anhang zu D-IX-

Tabelle 3:- Blatt 2

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6	Spalte 7	Spalte 8
31	0,995	-	0,775	144	0,957	-	11,514	2094
32	0,978	-	0,523	180	0,979	-	15,600	2831
33	0,995	0,997	0,532	221	0,986	0,994	13,895	3406
34	0,957	0,995	0,364	190	0,963	0,994	13,171	2837
35	0,988	0,996	0,469	209	0,951	0,979	11,337	2788
36	0,973	-	0,621	193	0,977	-	13,168	2794
37	0,980	0,996	0,538	206	0,960	0,977	15,064	3011
38	0,979	0,996	0,551	190	0,919	0,990	11,827	2548
39	0,992	0,998	0,565	183	0,943	0,963	13,455	2540
40	0,948	0,981	0,408	193	0,947	0,975	11,262	2655
41	0,984	0,985	0,433	219	0,988	0,995	12,998	2966
42	0,982	0,999	0,396	217	0,979	0,998	12,123	2793
43	0,984	0,989	0,619	201	0,962	0,997	12,990	2792
44	0,982	0,994	0,593	178	0,859	0,984	22,131	3025
45	0,991	0,994	0,455	186	0,958	0,995	14,291	2820
46	0,977	-	0,638	156	0,920	-	12,786	2032
47	0,981	-	0,700	179	0,970	-	14,308	2490
48	0,996	0,999	0,650	197	0,996	0,993	12,615	2738
49	0,998	0,999	0,533	204	0,992	0,995	13,176	2898
50	0,987	0,990	0,434	259	0,985	0,967	12,559	3755
51	0,991	0,995	0,586	194	0,985	0,996	14,367	2720
52	0,993	-	0,585	157	0,966	-	16,548	2280
53	0,988	0,995	0,370	267	0,971	0,992	12,995	3688
54	0,983	0,992	0,603	180	0,950	0,998	14,085	2403
55	0,994	0,992	0,530	187	0,883	0,835	10,283	2356
56	0,990	-	0,554	157	0,986	-	10,821	2153
57	0,998	0,999	0,352	206	0,992	0,997	15,091	3246
58	0,998	0,975	0,495	212	0,982	0,995	17,318	3183
59	0,980	-	0,963	137	0,359	-	12,600	1872
60	-	-	-	-	-	-	-	-

Ergebnisse des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung in niedrigen Belastungsbereichen (LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER)

In der folgenden Tabelle 4 wird eine Übersicht über die aus dem LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER ableitbaren Leistungsdaten gegeben. Neben den Korrelations- und Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz sind der LPI (Leistungspulsindex nach E.A. MÜLLER) und die W 170 (Rate of Work 170) dargestellt.

- Spalte 1: Korrelationskoeffizient (PEARSON-BRAVAIS) zwischen Belastung und Pulsfrequenz
- Spalte 2: Regressionskoeffizient zwischen Belastung und Pulsfrequenz
- Spalte 3: LPI nach E.A. MÜLLER, der mit dem Regressionskoeffizienten in der Spalte 2 fast identisch ist, aber als Unterschied auf 10-Watt-Stufen bezogen ist und damit den 10-fachen Wert des Regressionskoeffizienten in der Spalte 2 aufweist
- Spalte 4: Rate of Work 170 (W 170) in Watt, berechnet durch Extrapolation aus der linearen Regressionen zwischen Belastung und Pulsfrequenz

Die Korrelationskoeffizienten der Spalte 1 wurden alle auf ihre signifikante Verschiedenheit von Null geprüft* und erwiesen sich ausnahmslos als statistisch gesichert.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Daten der Leistungsfähigkeit
aus dem LPJ-Versuch nach E.A.MÜLLER

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4
1	-	-	-	-	31	0,985	0,399	3,99	198
2	0,994	0,492	4,92	149	32	-	-	-	-
3	0,993	0,455	4,55	223	33	0,980	0,587	5,87	142
4	0,949	0,420	4,20	177	34	0,969	0,405	4,05	239
5	0,970	0,407	4,07	208	35	0,980	0,295	2,95	311
6	0,994	0,403	4,03	223	36	0,988	0,408	4,08	236
7	0,975	0,453	4,53	180	37	0,987	0,358	3,58	254
8	0,987	0,267	2,67	370	38	0,993	0,253	2,53	323
9	0,996	0,378	3,78	248	39	-	-	-	-
10	0,993	0,450	4,50	193	40	0,986	0,314	3,14	266
11	0,996	0,256	2,56	276	41	0,981	0,411	4,11	221
12	-	-	-	-	42	0,988	0,335	3,35	248
13	-	-	-	-	43	0,993	0,314	3,14	273
14	-	-	-	-	44	0,756	0,182	1,82	357
15	-	-	-	-	45	0,992	0,268	2,68	352
16	0,998	0,303	3,03	268	46	0,987	0,438	4,38	179
17	0,958	0,207	2,07	334	47	0,994	0,441	4,41	181
18	0,978	0,344	3,44	228	48	0,981	0,368	3,68	277
19	0,999	0,377	3,77	243	49	0,995	0,356	3,56	227
20	0,998	0,438	4,38	179	50	0,992	0,302	3,02	324
21	0,995	0,517	5,17	185	51	0,988	0,384	3,84	210
22	-	-	-	-	52	0,995	0,490	4,90	185
23	0,978	0,288	2,88	227	53	0,983	0,212	2,12	379
24	0,978	0,536	5,36	187	54	0,995	0,427	4,27	199
25	0,993	0,310	3,10	277	55	0,979	0,336	3,36	202
26	0,991	0,424	4,24	194	56	0,992	0,365	3,65	235
27	0,994	0,382	3,82	236	57	-	-	-	-
28	0,985	0,348	3,48	215	58	-	-	-	-
29	0,997	0,401	4,01	228	59	0,994	0,458	4,58	179
30	0,992	0,377	3,77	213	60	0,984	0,379	3,79	250

Statistische Analyse der Daten der Leistungsfähigkeit -
eine Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

In den folgenden Abbildungen 3 bis 6 des Anhangs zu D sind die jeweilige Anzahl der Versuchsteilnehmer, die arithmetischen Mittel der Ergebnisse aus den Tabellen 2, 3 und 4 einschließlich Standardabweichung und Variabilitätskoeffizient gewissermaßen als Zusammenfassung zu den genannten Tabellen aufgeführt und graphisch dargestellt. In jeder der Abbildungen wird eine Größe der Leistungsfähigkeit (Regressionskoeffizient zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme, W 170 und V_{O_2} 170) hinsichtlich ihrer verschiedenen Werte aus den Versuchen nach WAHLUND und den Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung (Versuch von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min und LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER) beschrieben.

Es stehen jeweils:

- in der Abszisse die verschiedenen Versuche bzw. Versuchsvariationen und
- in der Ordinate die in der betreffenden Abbildung dargestellte Leistungsgröße.

Die römischen Ziffern in der Abszisse bedeuten folgende Versuche bzw. Versuchsvariationen:

- I) Versuch nach WAHLUND,
- II) Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min,
- IV) LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER

Die Versuchsvariation III in den Abbildungen 3 bis 6 des Anhangs zu D bleibt im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen außer Betracht.

Es symbolisieren:

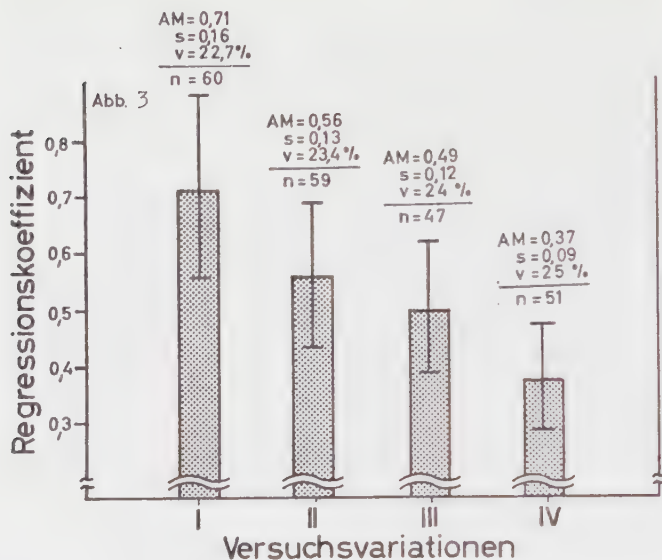
- n : die Anzahl der jeweiligen Versuchsteilnehmer,
- AM : das arithmetische Mittel der jeweiligen Größe der Leistungsfähigkeit,
- s : die zugehörige Standardabweichung und
- v : den zugehörigen Variabilitätskoeffizienten.

Es zeigt:

- die Abbildung 3 die Mittelwerte (mit den dazugehörigen statistischen Größen) der Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz für die Versuche bzw. Versuchsvariationen I - IV
- die Abbildung 4 die arithmetischen Mittel (mit den dazugehörigen statistischen Größen) der Werte für die W_{170} für die Versuche bzw. Versuchsvariationen I - IV
- die Abbildung 5 die Mittelwerte (mit den dazugehörigen statistischen Größen) der Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme für die Versuche bzw. Versuchsvariationen I - III, da beim Versuch IV die Sauerstoffaufnahme nicht gemessen wurde,
- die Abbildung 6 die arithmetischen Mittel (mit den dazugehörigen statistischen Größen) der Werte für die $V_{O_2}^{170}$, ebenfalls nur für die Versuchsvariationen I - III.

Abb.3 des Anhangs zu D

Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz bei den verschiedenen Versuchsvariationen

Abb.4 des Anhangs zu D

Die Werte der Rate of Work 170 (W 170) bei den verschiedenen Versuchsvariationen

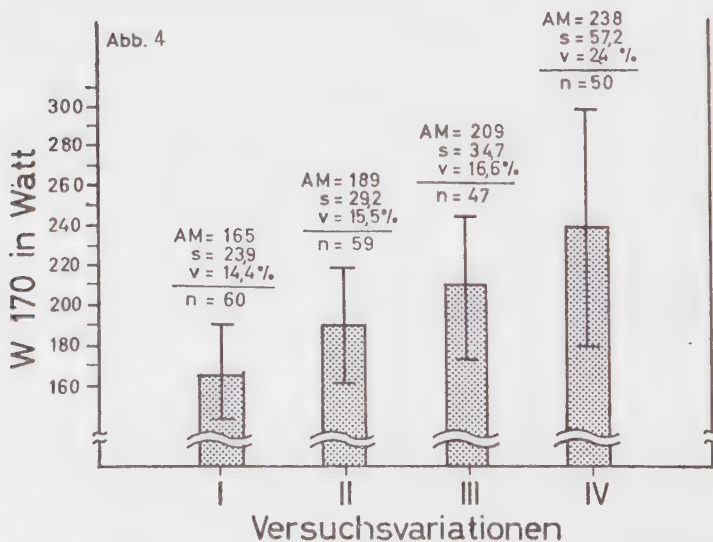


Abb.5 des Anhangs zu D

Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme bei den verschiedenen Versuchsvariationen

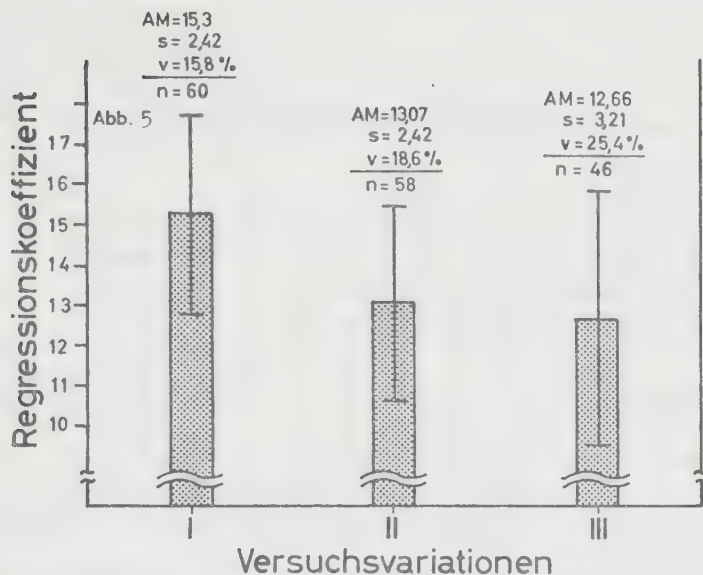
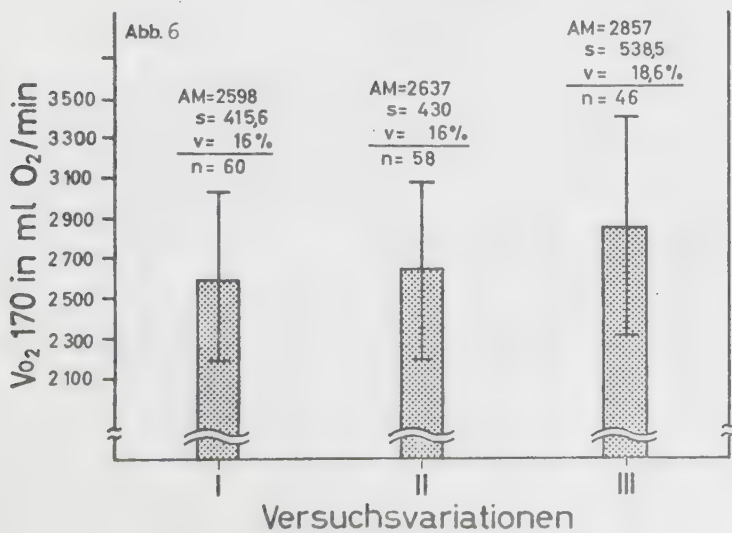


Abb.6 des Anhangs zu D

Die Werte der zur Rate of Work 170 gehörigen Sauerstoffaufnahme (V_{O_2} 170) bei den verschiedenen Versuchsvariationen



Daten zu den Vergleichen von Aussagekraft und Genauigkeiten
zwischen den einzelnen Versuchen

Daten zur Beurteilung der Aussagekraft der einzelnen Ver-
suche

Die folgende Tabelle 5 (des Anhangs zu D) zeigt einen Vergleich der Leistungsdaten der einzelnen Versuche untereinander. Diese Vergleiche bilden die Grundlage für die Beurteilung der Aussagekraft dieser Versuche.

Es stehen:

- in der Spalte 1: die Größen, welche aus den verschiedenen Versuchen ermittelt worden sind und verglichen werden,
- in der Spalte 2: die Korrelationskoeffizienten (PEARSON-BRAVAIS) zwischen den verglichenen Größen und deren Probabilität,
- in der Spalte 3: die Signifikanz der Verschiedenheit der verglichenen Größen, geprüft nach dem WILCOXON-Test.

Anhang zu D - XVII -

Tabelle 5: Zusammenfassender Überblick zum Vergleich der Daten der Leistungsfähigkeit aus den verschiedenen Versuchen

	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3
1	<u>zu 2.1.1 der Ergebnisse:</u> Überprüfung des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min bezüglich seiner Aussagekraft an Hand des Versuches nach WAHLUND		
1.1	Regressionskoeffizient zwischen Belastung und Pulsfrequenz	+ 0,499 Signifikante Korrelation	Signifikante Verschiedenheit
1.2	Rate of Work 170 (W 170)	+ 0,752 Signifikante Korrelation	Signifikante Verschiedenheit
1.3	Regressionskoeffizient zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme	- 0,067 Keine signifikante Korrelation	Signifikante Verschiedenheit
1.4	Sauerstoffaufnahme bei einer belastungsindizierten Pulsfrequenz von 170/min (V_{O_2} 170)	+ 0,729 Signifikante Korrelation	Keine signifikante Verschiedenheit
2	<u>zu 2.1.2 der Ergebnisse:</u> Überprüfung des LPJ-Versuches nach E.A.MÜLLER bezüglich seiner Aussagekraft an Hand des Versuches nach WAHLUND		
2.1	Regressionskoeffizient zwischen Belastung und Pulsfrequenz	+ 0,476 Signifikante Korrelation	Signifikante Verschiedenheit
2.2	Rate of Work 170 (W 170)	+ 0,691 Signifikante Korrelation	Signifikante Verschiedenheit
3	<u>zu 2.1.3 der Ergebnisse:</u> Vergleich der Werte aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min und aus dem LPJ-Versuch nach E.A.MÜLLER		
3.1	Regressionskoeffizient zwischen Belastung und Pulsfrequenz	+ 0,548 Signifikante Korrelation	Signifikante Verschiedenheit
3.2	Rate of Work 170 W 170	+ 0,619 Signifikante Korrelation	Signifikante Verschiedenheit

Daten zur Beurteilung der Genauigkeit der einzelnen Versuche

Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung einerseits und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme andererseits aus den einzelnen Versuchen und Versuchsvariationen

In der folgenden Tabelle 6 (des Anhangs zu D) werden die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung einerseits und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme andererseits aus den verschiedenen Versuchen untereinander verglichen. Dabei wurde jeder der Korrelationskoeffizienten zur Normalisierung seiner Verteilung zuerst der z-Transformation unterzogen. Dann wurde jeder dieser z-transformierten Korrelationskoeffizienten durch die mittlere Abweichung der Differenz der z-Werte der beiden zu vergleichenden Korrelationskoeffizienten dividiert, um auf diese Weise die verschiedenen Freiheitsgrade der zu vergleichenden Korrelationskoeffizienten in der angemessenen Weise im Rahmen des Vergleiches zu berücksichtigen. Diese mittlere Abweichung der Differenz der z-Werte besteht in der Quadratwurzel aus der Summe der reziproken Werte der Freiheitsgrade. Erst nach z-Transformation und der beschriebenen Quotientenbildung konnten die so umgerechneten Korrelationskoeffizienten im Rahmen einer Differenzbildung miteinander verglichen werden.

In der folgenden Tabelle 6 (des Anhangs zu D) sind die Quotienten aus der Differenz der z-Werte des zu vergleichenden Korrelationskoeffizientenpaares und der mittleren Abweichung dieser Differenzen erfaßt. Diese Quotientenbildung ist gleichwertig mit dem oben beschriebenen Rechengang. Die zugehörige Formel findet sich im Abschnitt "Material und Methodik" bei der Beschreibung der angewandten statistischen Verfahren. Die Signifikanzbeurteilung der Verschiedenheit beider Korrelationskoeffizienten erfolgte an Hand eines Schrankenwertes, an dem der genannte Quotient gemessen wurde. Für eine Wahrscheinlichkeit der Verschiedenheit von 95 % ($p \leq 0,05$) liegt dieser Schrankenwert im Falle der Normalverteilung, die ja durch die z-Transformation erreicht wurde, bei 1,96. Höhere Quotienten

bedeuten eine signifikante Verschiedenheit der Korrelationskoeffizienten.

Im einzelnen sind in der Tabelle 6 folgende Vergleiche angestellt worden:

- Spalte 1: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz aus dem Versuch nach WAHLUND und dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min,
- Spalte 2: Vergleich wie in Spalte 1, wobei aber aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min nur solche Wertepaare zur Berechnung ausgewählt wurden, deren Pulsfrequenzwerte mit denen des Versuches nach WAHLUND übereinstimmen (sog. korrespondierende Wertepaare),
- Spalte 3: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme aus dem Versuch nach WAHLUND und dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min,
- Spalte 4: Vergleich wie in Spalte 3, wobei aber aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min nur die oben bei Spalte 2 sog. korrespondierenden Wertepaare zur Berechnung der Korrelationskoeffizienten herangezogen wurden,
- Spalte 5: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz aus dem Versuch nach WAHLUND und dem LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER,
- Spalte 6: Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 9 Watt bis zu 170 Pulsen/min und dem LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER.

Die verglichenen Korrelationskoeffizienten sind in den Tabellen 2, 3 und 4 zu finden. Ein Vergleich erfolgte nur, wenn jedem der beiden Korrelationskoeffizienten mindestens vier Beobachtungspaare zugrunde lagen, woraus sich die vielen Lücken in der Tabelle 6 erklären.

Anhang zu D -XXI-

Tabelle 6: Vergleich der Korrelationskoeffizienten (PEARSON-BRAVAIS) zwischen Belastung und Leistung (Pulsfrequenz, Sauerstoffaufnahme) aus den einzelnen Versuchen und Versuchsvarianten

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6
1	+ 0,923	+ 0,721	+ 2,720	+ 1,551	-	-
2	-	-	-	-	-	0
3	+ 1,393	+ 0,570	+ 2,189	+ 0,909	+ 0,911	- 0,971
4	-	-	-	-	-	+ 1,498
5	0	+ 0,164	+ 1,396	+ 0,635	+ 0,433	+ 0,894
6	+ 0,497	+ 0,348	+ 0,211	- 0,738	0	- 0,770
7	-	-	-	-	-	- 0,084
8	+ 1,511	+ 0,550	+ 0,817	+ 0,804	+ 1,602	+ 0,278
9	+ 0,778	+ 0,389	+ 2,450	+ 0,245	+ 0,135	- 1,250
10	- 2,390	+ 0,335	+ 1,355	+ 0,863	- 0,560	- 0,354
11	+ 1,793	- 0,389	+ 0,817	+ 0,445	+ 0,649	- 2,404
12	0	0	+ 0,747	- 0,166	-	-
13	-	-	-	-	-	-
14	+ 0,766	+ 0,547	+ 0,890	- 0,245	-	-
15	-	-	-	-	-	-
16	- 0,913	+ 0,996	- 0,257	- 0,250	- 1,318	- 0,966
17	+ 1,511	- 0,806	+ 1,325	+ 0,316	+ 2,343	+ 1,528
18	+ 1,049	+ 0,459	+ 2,503	0	+ 1,501	+ 0,822
19	+ 2,129	+ 0,974	+ 1,720	+ 0,949	0	- 3,378
20	-	-	-	-	-	- 1,447
21	-	-	-	-	-	- 0,799
22	+ 1,094	+ 0,815	+ 0,194	- 0,629	-	-
23	+ 1,193	+ 0,815	-	-	+ 1,451	+ 0,632
24	-	-	-	-	-	+ 1,871
25	+ 0,219	+ 0,249	+ 2,991	+ 1,621	+ 0,616	+ 0,568
26	-	-	-	-	-	+ 1,091
27	+ 1,327	- 0,443	+ 1,975	+ 1,814	+ 0,514	- 1,541
28	-	-	-	-	-	+ 1,239
29	+ 1,005	+ 0,492	+ 1,431	- 0,144	- 0,239	- 2,408
30	-	-	-	-	-	- 0,325

Tabelle 6: - Blatt 2 -

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6
31	-	-	-	-	-	+ 0,87
32	-	-	-	-	-	-
33	- 0,528	- 0,571	+ 0,117	- 0,215	+ 0,136	+ 1,43
34	+ 1,272	+ 0,181	+ 0,956	+ 0,064	+ 1,098	- 0,33
35	+ 1,169	+ 0,347	+ 2,546	+ 1,527	+ 1,440	+ 0,53
36	-	-	-	-	-	- 0,83
37	+ 1,096	+ 0,245	- 0,180	- 0,334	+ 0,877	- 0,43
38	+13,883	0	+ 2,090	+ 0,815	+ 0,262	- 1,06
39	+17,350	+ 0,245	+ 0,787	+ 0,434	-	-
40	+ 1,282	+ 0,987	- 0,247	- 0,576	+ 0,964	- 0,45
41	+ 0,101	+ 0,051	- 0,821	- 0,917	+ 0,180	+ 0,18
42	+ 0,157	- 0,909	- 0,551	- 1,242	- 0,037	- 0,42
43	+ 0,395	+ 0,161	+ 0,883	- 0,245	0	- 0,82
44	+ 1,342	+ 0,634	+ 1,975	+ 0,738	+ 2,631	+ 2,45
45	- 0,128	- 0,304	+ 1,657	+ 0,256	- 0,200	- 0,11
46	-	-	-	-	-	- 0,49
47	-	-	-	-	-	- 1,08
48	- 0,329	- 0,736	+ 1,158	+ 0,300	+ 0,408	+ 1,55
49	+ 0,194	- 0,389	- 0,153	- 0,279	+ 0,239	+ 0,93
50	+ 0,053	- 0,097	+ 1,795	+ 1,756	- 0,254	- 0,52
51	+ 1,044	+ 0,570	+ 0,436	- 0,144	+ 1,165	+ 0,28
52	-	-	-	-	-	- 0,87
53	+ 1,656	+ 0,806	+ 1,784	+ 0,694	+ 1,771	+ 0,38
54	+ 0,493	+ 0,101	+ 1,002	- 0,389	- 0,085	- 1,18
55	+ 0,839	+ 0,736	+ 0,842	+ 0,774	+ 1,428	+ 1,17
56	-	-	-	-	-	- 0,19
57	- 1,022	- 1,201	+ 0,184	- 0,347	-	-
58	+ 0,331	+ 1,967	+ 1,375	+ 0,570	-	-
59	-	-	-	-	-	- 0,87
60	-	-	-	-	+ 0,271	-

Tabelle 6: - Blatt 3 -

Lfd. Nr.	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3	Spalte 4	Spalte 5	Spalte 6
	Folgende Quotienten sichern eine signifikante Verschiedenheit der Korrelationskoeffizienten:					
Lfd. Nr.	10	58	1	-	17	19
"	19	-	3	-	44	29
"	38	-	9	-	-	44
"	39	-	18	-	-	-
"	-	-	25	-	-	-
"	-	-	27	-	-	-
"	-	-	35	-	-	-
"	-	-	38	-	-	-
"	-	-	44	-	-	-
	Anzahl der signifikant verschiedenen Korrelationskoeffizienten:					
	4 von 40	1 von 40	9 von 39	0 von 39	2 von 34	3 von 49

(Je größer die Absolutwerte der in der Tabelle aufgeführten Zahlen sind, desto größer ist der Unterschied zwischen den beiden zugrunde liegenden Korrelationskoeffizienten. Allerdings kann für die meisten Zahlen die Null-Hypothese nicht abgelehnt werden, so daß die Annahme der zufälligen Abweichung der zugrunde liegenden Korrelationskoeffizienten weithin Geltung beanspruchen kann. Nur die Zahlen, deren laufende Nummern jeweils unter den Spalten stehen, repräsentieren eine signifikante Verschiedenheit der zugrunde liegenden Korrelationskoeffizienten.

Ein positives Vorzeichen bedeutet, daß der erste Korrelationskoeffizient größer ist als der zweite; ein negatives Vorzeichen bedeutet das Gegenteil.)

Vergleich der Varianzen zur linearen Regression zwischen Belastung und Pulsfrequenz zwischen den beiden Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung

In der folgenden Tabelle 7 (des Anhangs zu D), welche ebenso wie die Tabelle 6 noch Daten zur Beurteilung der Genauigkeit der einzelnen Versuche auführt, werden die Varianzen, Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten zur linearen Regression zwischen Belastung und Pulsfrequenz beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min und beim LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER aufgeführt und außerdem die genannten Varianzen zwischen diesen beiden Versuchen verglichen. Die gesamte Tabelle 7 ist also lediglich eine Erweiterung der Spalte 6 der Tabelle 6.

Im einzelnen gibt die Tabelle 7 folgende Informationen:

- Spalte 1: Anzahl der Beobachtungspaare (Belastungswert, Pulsfrequenzwert) beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min, aus denen sich durch Subtraktion der Zahl 2 die Anzahl der Freiheitsgrade ergibt,
- Spalte 2: Varianzen der Pulsfrequenzwerte zur Regressionsgeraden zwischen Belastung und Pulsfrequenz beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min,
- Spalte 3: Standardabweichungen der Pulsfrequenzwerte zur Regressionsgeraden zwischen Belastung und Pulsfrequenz beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min,
- Spalte 4: Variabilitätskoeffizienten der linearen Regressionen zwischen Belastung und Pulsfrequenz beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min,
- Spalte 5: Analogwerte zur Spalte 1, jetzt aber bezogen auf den LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER,

Spalte 6: Analogwerte zur Spalte 2, jetzt aber bezogen auf den LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER,

Spalte 7: Analogwerte zur Spalte 3, jetzt aber bezogen auf den LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER,

Spalte 8: Analogwerte zur Spalte 4, jetzt aber bezogen auf den LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER,

Spalte 9: Quotient aus der Varianz der linearen Regression zwischen Belastung und Pulsfrequenz beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min und aus der analogen Varianz beim LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER, wobei die grössere Varianz im Zähler des Quotienten steht,

Spalte 10: Schrankenwert zur Signifikanzbeurteilung des Quotienten der Spalte 9 im Hinblick auf die Unterschiedlichkeit der verglichenen Varianzen,

Spalte 11: Signifikanzbeurteilung der Verschiedenheit der verglichenen Varianzen, wobei "ns" nicht signifikant heißt und eine statistisch unsichere Verschiedenheit der Varianzen bedeutet, und wobei "s" eine signifikante Verschiedenheit der Varianzen bedeutet. In Klammer steht hinter s dann, welche Varianz signifikant größer ist: die Zahl "1" repräsentiert dabei den Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min, die Zahl "2" den LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER.

Die Daten zu den Regressionsgeraden, auf die sich die Varianzen, Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten der Tabelle 7 beziehen, sind in den Tabellen 3 und 4 zu finden.

Anhang zu D - XXVI -

Tabelle 7: Varianzen, Standardabweichungen und Variabilitätskoeffizienten zur linearen Regression zwischen Belastung und Pulsfrequenz bei den Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung (Versuch von 90 Watt bis 170 Pulse/min und LPJ-Versuch), sowie Vergleich der beiden Varianzen zwischen diesen beiden Versuchen

Lfd. Nr.	Versuche mit kontinuierlicher Belastungs- steigerung Versuch von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min				LPJ-Versuch E.A.M Ü L L E R				Signifikanz- Beurteilung		
	Spalte				Spalte				Spalte		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	12	16,301	4,037	3,0%	-	-	-	-	-	-	-
2	6	3,450	1,857	1,2%	10	3,032	1,741	1,4%	1,138	3,24	ns
3	11	12,620	3,552	2,5%	10	3,027	1,740	1,0%	4,169	3,33	s(1>2)
4	8	5,944	2,438	1,7%	10	20,011	4,482	3,8%	3,350	4,15	ns
5	11	10,203	3,194	2,3%	10	10,744	3,278	3,0%	1,053	3,18	ns
6	12	9,850	3,138	2,2%	10	20,348	4,511	4,4%	2,066	3,07	ns
7	6	8,037	2,835	1,8%	10	10,923	3,305	2,0%	1,359	6,04	ns
8	15	11,678	3,417	2,6%	10	1,949	1,396	1,6%	5,992	3,26	s(1>2)
9	9	8,250	2,872	1,9%	10	1,190	1,091	1,1%	6,933	3,50	s(1>2)
10	10	9,078	3,013	2,1%	10	2,960	1,721	1,6%	3,067	3,44	ns
11	13	20,284	4,504	3,0%	10	0,544	0,738	0,7%	37,287	3,31	s(1>2)
12	13	3,577	1,891	1,3%	-	-	-	-	-	-	-
13	9	18,015	4,244	3,0%	-	-	-	-	-	-	-
14	12	10,177	3,190	2,3%	-	-	-	-	-	-	-
15	10	12,527	3,539	2,5%	-	-	-	-	-	-	-
16	15	6,507	2,551	1,9%	10	0,380	0,616	0,6%	17,124	3,26	s(1>2)
17	15	7,918	2,814	2,0%	10	3,952	1,988	1,8%	2,004	3,26	ns
18	14	4,856	2,206	1,5%	10	5,551	2,356	2,1%	1,141	2,35	ns
19	14	24,007	4,899	3,6%	10	0,294	0,542	0,5%	81,656	3,28	s(1>2)
20	9	5,263	2,294	1,5%	10	0,795	0,822	0,8%	6,620	3,50	s(1>2)
21	6	9,930	3,151	2,1%	10	2,786	1,669	1,6%	3,564	3,84	ns
22	12	8,300	2,881	2,0%	-	-	-	-	-	-	-
23	14	7,053	2,656	1,8%	10	3,894	1,973	1,6%	1,811	3,28	ns
24	10	2,495	1,580	1,1%	10	13,485	3,672	3,7%	5,405	3,44	s(2>1)
25	13	2,396	1,548	1,1%	10	1,410	1,127	1,2%	1,699	3,31	ns
26	6	0,985	0,992	0,7%	10	3,395	1,843	1,7%	3,447	6,04	ns
27	8	27,730	5,266	3,8%	10	1,827	1,352	1,3%	15,178	3,58	s(1>2)
28	10	3,652	1,911	1,4%	10	3,845	1,951	1,7%	1,053	3,44	ns
29	9	21,980	4,688	3,0%	10	1,002	1,001	0,9%	21,963	3,50	s(1>2)
30	7	4,990	2,234	1,5%	10	2,381	1,543	1,4%	2,096	3,69	ns

Anhang zu D - XXVII -

Tabelle 7: - Blatt 2 -

		Versuche mit kontinuierlicher Belastungs- steigerung								Signifikanz- Beurteilung				
		Versuch von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min				LPJ-Versuch E.A.M Ü L L E R								
Lfd. Nr.	Spalte	1	2	3	4	Spalte	5	6	7	8	Spalte	9	10	11
31	7	3,399	1,844	1,2%	10	5,063	2,250	1,2%	1,490	4,82	ns			
32	10	12,863	3,587	2,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	14	5,417	2,327	1,7%	10	14,660	3,829	3,2%	2,706	2,85	ns			
34	12	17,369	4,168	2,7%	10	11,029	3,321	3,5%	1,575	3,35	ns			
35	14	10,199	3,194	2,2%	10	3,685	1,920	2,0%	2,768	3,28	ns			
36	13	35,946	5,995	4,2%	10	4,200	2,049	2,1%	8,559	3,31	s(1>2)			
37	12	17,088	4,134	3,0%	10	3,516	1,875	1,9%	4,860	3,35	s(1>2)			
38	11	15,908	3,988	2,8%	10	0,935	0,967	0,9%	17,014	3,39	s(1>2)			
39	11	6,348	2,520	1,7%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	12	10,852	3,294	2,2%	10	2,917	1,708	1,6%	3,720	3,35	s(1>2)			
41	14	11,636	3,411	2,4%	10	6,816	2,611	2,6%	1,707	3,28	ns			
42	14	11,081	3,329	2,3%	10	2,825	1,681	1,6%	3,922	3,28	s(1>2)			
43	12	17,992	4,242	3,1%	10	1,442	1,201	1,2%	12,477	3,35	s(1>2)			
44	9	11,169	3,342	2,4%	10	25,492	5,049	4,4%	2,282	3,73	ns			
45	11	4,628	2,151	1,4%	10	1,209	1,100	1,2%	3,828	3,39	s(1>2)			
46	8	13,589	3,686	2,5%	10	5,265	2,295	2,0%	2,581	3,58	ns			
47	10	19,788	4,448	3,2%	10	2,433	1,560	1,4%	8,133	3,44	s(1>2)			
48	12	4,870	2,207	1,6%	10	5,467	2,338	2,6%	1,123	3,07	ns			
49	13	1,889	1,374	0,9%	10	1,332	1,154	1,1%	1,418	3,31	ns			
50	17	13,606	3,689	2,8%	10	1,532	1,238	1,4%	8,881	3,22	s(1>2)			
51	13	8,997	2,999	2,1%	10	3,730	1,931	1,7%	2,412	3,35	ns			
52	8	3,392	1,842	1,2%	10	2,505	1,583	1,5%	1,354	3,58	ns			
53	18	10,139	3,184	2,3%	10	1,624	1,274	1,3%	6,243	3,20	s(1>2)			
54	11	15,522	3,940	2,7%	10	1,898	1,378	1,3%	8,178	3,39	s(1>2)			
55	10	3,522	1,877	1,3%	10	5,046	2,246	1,9%	1,433	3,44	ns			
56	8	4,357	2,087	1,4%	10	2,231	1,494	1,4%	1,953	3,58	ns			
57	13	0,822	0,907	0,6%	10	3,097	1,760	1,8%	3,768	2,95	s(2>1)			
58	13	1,629	1,276	0,9%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	6	16,917	4,039	2,8%	10	2,632	1,622	1,4%	6,352	3,84	s(1>2)			
60	-	-	-	-	10	4,880	2,209	2,3%	-	-	-	-	-	-

(Der Quotient aus beiden Varianzen, wobei die größere Varianz im Zähler steht, ist ein Maß für die Verschiedenheit der Varianzen. Je größer der Quotient ist, desto mehr weichen die Varianzen voneinander ab. Die Signifikanzbeurteilung des Quotienten erfolgt unter Berücksichtigung der Freiheitsgrade beider Varianzen an Hand des Schrankenwertes in Spalte 10, während der Quotient selbst in Spalte 9 steht.)

E. B E S P R E C H U N G D E R E I G E N E N E R G E B N I S S E

Vor der Beschreibung der Ergebnisse aus den eigenen Versuchen wurden die Möglichkeiten der Ergometrie im Hinblick auf die Bedürfnisse in der praktischen Medizin theoretisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Überlegungen sind in den Schlußfolgerungen des Abschnittes "B" zusammengefaßt. - Bei den eigenen Versuchen stand im wesentlichen nur noch das Problem der Form der Belastungssteigerung zur Debatte. In diesem Zusammenhang wurden die stufenweise Belastungssteigerung (WAHLUND'scher Versuch) und die kontinuierliche Belastungssteigerung (Versuch von 90 Watt bis 170 Pulse/min; MÜLLER'scher LPI-Versuch) einander gegenübergestellt.

Die einzelnen Versuchsvariationen konnten aus organisatorisch-technischen Gründen nicht zu denselben Tageszeiten durchgeführt werden. Nun bestehen nach VOIGT, ENGEL und KLEIN (39) auch bezüglich der Leistungsfähigkeit zirkadiane Rhythmen, die die Vergleichbarkeit der Versuche doch einschränken könnten. Nach STEGEMANN (35) ist es allerdings nur die Leistungsbereitschaft als Komplex psycho-physiologischer Größen, welche im besonderen den tagesrhythmischen Schwankungen unterliegt, während die Leistungsfähigkeit an sich weitgehend im Tagesverlauf konstant bleibt. Nach KIRCHHOFF (Diskussion im Rahmen der 21. Flugmedizinischen Arbeitstagung in Fürstenfeldbruck, 1972) unterliegen nur submaximale Leistungsgrößen tagesrhythmischen Schwankungen, während direkt gemessene maximale und praemaximale Leistungsgrößen diesen Rhythmen nicht unterliegen würden. Nach den Aussagen von KIRCHHOFF und STEGEMANN wären also die durchgeführten Versuche durchaus vergleichbar.

1. Besprechung des Versuches mit stufenweiser Belastungs- steigerung (Versuch nach WAHLUND)

1.1. Besprechung der aus dem Versuch nach WAHLUND ermittel- ten Ergebnisse

Bei allen Probanden waren beim Versuch nach WAHLUND die Bedingungen der Ergostase hinsichtlich der Pulsfrequenz bis zu einer Pulsfrequenz von 170 Pulsen/min durchwegs erfüllt. Somit lassen sich die W_{170} , $\dot{V}O_2$ 170 und analogen Größen gut für dieselben Auswertungen verwenden, für welche die Größen bei Maximaler Ergostase verwendet werden, zumal nach WIRZ (42) die Rate of Work 170 (W_{170}) und die Maximale Ergostase sowieso zueinander in enger Beziehung stehen. In Übereinstimmung mit HOLLMANN (16) war auch bei höheren Belastungsstufen nach zwei bis drei Minuten die Pulsfrequenz soweit adaptiert, daß sie bis zum Ende der sechsten Minute nur noch um weniger als acht Schläge stieg. Dies sind allerdings Mittelwerte mit extrem hohen Standardabweichungen, so daß eine Belastung von fünf bis sechs Minuten pro Stufe zur Beurteilung der Ergostase nach wie vor geboten ist.

Beim WAHLUND'schen Versuch sind die Korrelationen zwischen Belastung und Pulsfrequenz bei 6,7 % der Probanden und die Korrelationen zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme bei 18,3 % der Probanden statistisch unsicher, wobei Versuchsteilnehmer aller Leistungsklassen betroffen sind. Die Tatsache, daß von der statistischen Unsicherheit im besonderen die Sauerstoffaufnahme betroffen ist, spricht wiederum für den nicht zu unterschätzenden Einfluß bei der Bewältigung von Arbeit jenseits der Dauerleistungsgrenze durch anaerobe Energiebereitstellung. Hierdurch wird erneut bestätigt, wie wichtig die unmittelbare Bestimmung praemaximaler und maximaler Leistungsgrößen ist, weil der Kurvenverlauf im Einzelfall nie vorausgesagt werden kann.

Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz entsprechen beim Versuch nach WAHLUND mit einem Durch-

schnittswert von 0,71 einem MÜLLER'schen LPI von 7,1. Dieser hohe Wert dürfte darin begründet sein, daß die Pulsfrequenz doch nicht streng linear mit der Belastung ansteigt und im besonderen jenseits der Dauerleistungsgrenze steiler ansteigt als bei den geringen und mittleren Belastungen des Versuches nach E.A. MÜLLER. Diese Beobachtungen würden auch von SIEBER (34) gemacht. - Die Werte für die W 170 mit einem Mittelwert von 165 Watt liegen zwar deutlich unter den Werten von 220 bis 230 Watt, welche HOLLMANN (16) bei 168 Pulsen/min bei männlichen Sportlern der 3. Lebensdekade bei 3-minütlicher Belastungssteigerung angibt. Eine Übereinstimmung wird indes denkbar, wenn man die längere Dauer sowie den langsameren Belastungsanstieg des WAHLUND'schen Versuchs und den nur durchschnittlichen Trainingszustand des eingangs beschriebenen Probandengutes berücksichtigt. Die $\dot{V}_{O_2}$ 170 mit durchschnittlich 2598 ml O_2 /min (STPD) und einem Variabilitätskoeffizienten von 16 % entspricht gut einem von REINDELL, KÖNIG und HOFFMANN (29) angegebenen Wert der Sauerstoffaufnahme von 2359 ml O_2 /min bei Maximaler Ergostase, der an gesunden männlichen Studenten der 3. Lebensdekaden ermittelt wurde. Dieser Sachverhalt spricht erneut dafür, daß die $\dot{V}_{O_2}$ 170 den Maximalen Sauerstoffpuls, beispielsweise bei der Berechnung des Herzvolumenleistungsquotienten, ersetzen kann. - Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die Leistungsdaten der vorliegenden Untersuchungen für den Fall des WAHLUND'schen Versuches mit vergleichbaren Messungen anderer Autoren im wesentlichen im Einklang stehen.

1.2. Kritik der praktischen Anwendbarkeit des Versuches nach WAHLUND

Bei der stufenweisen Form der Belastungssteigerung mit einer Ergostase auf jeder Belastungsstufe ist in jedem Fall eine gewisse Anpassung des Sauerstofftransportsystems an die Belastung gegeben. Aus diesem Grunde konnte der WAHLUND'sche Versuch zur Überprüfung der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung hinsichtlich Aussagekraft und Genauigkeit verwendet werden. Nach SIEBER (34), der minütliche Belastungsstei-

gerung, stufenweise Belastungssteigerung (mit Ergostase) und konstante Belastung verglichen hat, sind die zwar miteinander korrelierenden Ergebnisse der einzelnen Versuchsvariationen numerisch verschieden, wobei die dem WAHLUND'schen Versuch analoge stufenweise Belastungssteigerung nicht nur die größte Aussagekraft, sondern auch den größten Informationsgehalt besitzt, weil mehrere Leistungsstufen erfaßt werden. Da aber der Versuch nach WAHLUND, wie er im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen durchgeführt wurde, schon allein wegen der langen Dauer für die klinische Praxis ausscheidet, konnte er nur als Kontrollversuch für die kontinuierliche Belastungssteigerung Verwendung finden.

2. Besprechung der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung

2.1. Besprechung des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min

2.1.1. Besprechung der aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min ermittelten Ergebnisse

Die Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz (bzw. Sauerstoffaufnahme) liegen beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min niedriger als beim WAHLUND'schen Versuch, aber höher als beim LPI-Versuch. Versuchsdauer und Belastungshöhe spielen also doch eine große Rolle. Die Werte der W 170 liegen leistungsmäßig ebenfalls zwischen den beiden genannten Versuchsvariationen, während bei der V_{O_2} 170 die Unterschiede in Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Unabhängigkeit des Maximalen Sauerstoffpulses von der Versuchsvariation von HOLLMANN, VALENTIN, VENRATH und BONNEKOH (15) numerisch weitaus geringfügiger sind.

Die Werte für die W 170 liegen mit einem Mittel von 189 Watt um durchschnittlich etwa 24 Watt höher als beim Versuch nach WAHLUND. Dies stimmt etwa mit den Angaben von RUTENFRANZ (30, 31, 33) überein, wonach bei kontinuierlicher Belastungssteigerung die Werte für die W 170 durchschnittlich um etwa 30 Watt (180 m kp/min) höher liegen als beim Versuch nach WAHLUND. RUTENFRANZ und MOCELLIN (33) geben für 18- bis 19-jährige männliche Probanden einen Mittelwert der W 170 von etwa 250 Watt an. Die Höhe dieser Leistung ist nur dadurch zu erklären, daß die Werte für die W 170 von den Autoren im wesentlichen durch Extrapolation aus dem LPI-Versuch ermittelt wurden.

Die Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme sind beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min bis auf wenige Ausnahmen (bei der Korrelation zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme) statistisch gesichert. Wenn man die besonders bei der kontinuierlichen Belastungssteigerung auftretenden und bei der Beschreibung der Geräte erläuterten Besonderheiten der Sauerstoffmessung durch den Metabographen bedenkt, muß man an Hand der genannten Korrelationskoeffizienten eine doch ausreichende Adaptation an die minütliche Belastungssteigerung annehmen. - Zu einer ähnlichen Beurteilung der Adaptation führt auch der Vergleich der Korrelationskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme, der paarweise zwischen dem WAHLUND'schen Versuch und dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung durchgeführt wurde. Die Abweichungen der Korrelationen waren, abgesehen von denen zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme, fast nur zufällig, so daß kein Unterschied in der Genauigkeit zwischen den beiden erwähnten Versuchen nachgewiesen werden konnte. Die in 23 % der Fälle beim WAHLUND'schen Versuch signifikant höhere Korrelation zwischen Belastung und Sauerstoffaufnahme könnte apparativ bedingt sein und darf daher nicht überbewertet werden.

Die Ergebnisse des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min zeigen zusammenfassend betrachtet eine Übereinstimmung mit den Messungen anderer Autoren, eine recht gute Adaptation an die minütliche

Belastungssteigerung, sofern diese an Hand der Korrelationen zwischen Belastung und Kreislaufgrößen beurteilt wird, aber numerische Abweichungen zu den vergleichbaren Ergebnissen des Versuches nach WAHLUND, dessen Werte in ihrer Aussagekraft verbindlich für die anderen durchgeführten Versuche sind.

2.1.2. Kritik der praktischen Anwendbarkeit des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min

Der große Vorteil des Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min liegt im Vergleich zum WAHLUND'schen Versuch in seiner Kürze, die ein außerordentlich wichtiges Kriterium der Brauchbarkeit für die klinische Praxis darstellt.

Aus der Gegenüberstellung der Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz beziehungsweise Sauerstoffaufnahme erkennt man, daß die Anstiege der Pulsfrequenz und der Sauerstoffaufnahme bei der kontinuierlichen Belastungssteigerung niedriger sind als beim WAHLUND'schen Versuch. Dieses Phänomen ist nach SIEBER (34) weniger durch Ermüdung infolge der längeren Versuchsdauer der stufenweise ansteigenden Belastung (WAHLUND'scher Versuch) als dadurch zu erklären, daß die Pulsfrequenz (bzw. Sauerstoffaufnahme) selbst der minimalen Steigerung von minütlich 10 Watt nicht folgen kann. Dies sei weiterhin nicht nur jenseits der Dauerleistungsgrenze, sondern schon bei den geringen Belastungen des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER der Fall. Damit ist nicht nur die Aussagekraft der erzielten Leistungsergebnisse, sondern auch die Adaptation an die vorgegebenen Belastungen beim WAHLUND'schen Versuch besser als bei kontinuierlicher Belastungssteigerung. Letzterer Sachverhalt wäre bei alleiniger Betrachtung der Korrelationen zwischen Belastung und Kreislaufgrößen, aus der in der weitaus überwiegenden Zahl der Fälle genügend enge Beziehungen resultieren, die für eine ausreichende Adaptation sprachen, nicht aufgefallen.

Bei der Bestimmung der W 170 mit Hilfe der kontinuierlichen Belastungssteigerung verwendet RUTENFRANZ (30, 31, 32, 33) zur

Berechnung: Anfangsbelastung, zugehörige Pulsfrequenz und den Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz. Ein zu dieser Formel gehöriges Nomogramm ist im Anhang zu B abgebildet. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden an Stelle der Anfangsbelastung und der zugehörigen Pulsfrequenz die mathematisch richtigeren Koordinatenmittelwerte der Regressionsgeraden verwendet. - Weiterhin ist es nicht richtig, wenn RUTENFRANZ (30) behauptet, daß bei der kontinuierlichen Belastungssteigerung infolge der größeren Zahl von Meßwerten eine größere Genauigkeit als beim WAHLUND'schen Versuch resultiere. Bei letzterem Versuch ist nämlich jeder Einzelwert ein Ergostase-Mittelwert und basiert also schon auf mehreren Einzelwerten.

Zusammenfassend beurteilt ist der Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min zwar von relativ kurzer Dauer, aber wegen der geringeren Aussagekraft und der trotz minimaler Belastungssteigerung in der Zeiteinheit nicht gewährleisteten vollen Adaptation an die Belastung im Vergleich zum Versuch nach WAHLUND für die Verwendbarkeit selbst in der klinischen Praxis doch in Frage gestellt.

2.2. Besprechung des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER

2.2.1. Besprechung der aus dem LPI-Versuch ermittelten Ergebnisse

Mit dem LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER (27) soll im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen die bei mittleren und praemaximalen Leistungen bereits besprochene Form der kontinuierlichen Belastungssteigerung nun auch bei submaximalen Leistungen näher betrachtet werden.

Die LPI-Werte mit einem Mittelwert von 3,7 und einem Variabilitätskoeffizienten von 25 % entsprechen etwa den Angaben von E.A. MÜLLER (27) und H. W. KIRCHHOFF (20). Die berechneten Werte für die W 170 mit einem Mittelwert von 238 Watt und einem Variabilitätskoeffizienten von 24 % stimmen mit dem

von RUTENFRANZ und MOCELLIN (33) ermittelten Durchschnittswert von etwa 250 Watt (1547 m kp/min) bei 18 1/2-jährigen männlichen Probanden überein. Dies bestätigt die schon oben erwähnte Annahme, daß die genannten Autoren die Werte für die W 170 aus submaximaler Belastung ermittelt haben.

Die Leistungsdaten (Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz sowie W 170) liegen beim LPI-Versuch systematisch höher als beim anderen Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung und als beim WAHLUND'schen Versuch. Da aber andererseits korrelative Beziehungen zwischen den Leistungsdaten der verschiedenen Versuchsvariationen bestehen, stimmen diese Beobachtungen gut mit denen von SIEBER (34) überein. Er beschreibt außerdem einen verschiedenen Pulsanstieg in den einzelnen Abschnitten einer Belastungssteigerung mit Beginn bei geringsten Belastungen und ansteigend bis zu praemaximalen Leistungen. Aus diesen und den eigenen Feststellungen geht also hervor, daß die Pulsfrequenz mit zunehmender Belastung geometrisch progressiv zunimmt und nur abschnittsweise lineare Beziehungen in Näherung gelten.

Beim LPI-Versuch sind die Korrelationen zwischen Belastung und Pulsfrequenz ausnahmslos signifikant von Null verschieden und wären dies auch noch bei einer Wahrscheinlichkeitsforderung von 99,9 % ($p \leq 0,001$). Im paarweisen Vergleich dieser Korrelationskoeffizienten mit den analogen Korrelationen aus dem WAHLUND'schen Versuch und aus dem Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min sind in der weitaus überwiegenden Zahl der Fälle die Korrelationen nur zufällig verschieden und somit als weitgehend gleichwertig zwischen dem LPI-Versuch und den anderen beiden Versuchsvariationen zu betrachten. Beim Vergleich der Varianzen der Pulsfrequenzen um die Regressionsgerade zwischen Belastung und Pulsfrequenz, wie er nur zwischen den beiden Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung angestellt wurde, sind sogar beim MÜLLER'schen LPI-Versuch in einem Großteil (42 %) der Fälle die Streuungen um die linearen Regressionen signifikant geringer, was für eine bessere Adaptation spricht. Umgekehrte Verhältnisse gab es dagegen nur bei 4 % der Vergleichsfälle. - Aus all diesen Feststellungen ergibt sich beim LPI-Versuch eine

bessere Adaptation der Pulsfrequenz an die Belastung als beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung in den höheren Leistungsbereichen. Somit sind auch die korrelativen Beziehungen zwischen Belastung und Pulsfrequenz von der Belastungshöhe abhängig.

Zusammenfassend betrachtet läßt sich für die Ergebnisse aus dem LPI-Versuch feststellen, daß die Aussagekraft dieses Versuches hinsichtlich praemaximaler Leistungsgrößen eindeutig geringer ist als die des WAHLUND'schen Versuches und sogar geringer als die des anderen Versuches mit kontinuierlicher Belastungssteigerung bis zu einer Pulsfrequenz von 170 Pulsen/min. Andererseits sind die Bindungen der Pulsfrequenz an die Belastung beim LPI-Versuch überraschend gut und in fast der Hälfte der Versuche sogar besser als beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min. Die numerischen Werte der eigenen Ergebnisse aus dem LPI-Versuch (LPI, W 170) stimmen mit denen anderer Autoren überein.

2.2.2. Kritik der praktischen Anwendbarkeit des LPI-Versuches nach E.A. MÜLLER

Die praktische Anwendbarkeit des LPI-Versuches wurde bereits von vielen Autoren überprüft. KIRCHHOFF (20) gibt für das Test-Retest-Verfahren eine Genauigkeit von etwa 10 % an und weist besonders auf die Gefahr des Schein-LPI bei Kreislauf labilen mit hohem Ruhepuls hin. BLOEMKE, STUMPF, STELZER und ARIES (3) fanden bei der Untersuchung der Test-Retest-Reliabilität eine relativ gute Zeitstabilität des Zuverlässigkeitskoeffizienten. Diese war aber bei der Bestimmung der Maximalen Sauerstoffaufnahme durch dieselben Autoren (3) mittels des Nomogramms nach ÅSTRAND und RHYMING noch wesentlich zuverlässiger. EHRENSTEIN und MÜLLER-LIMMROTH (8) kritisieren beim LPI-Versuch besonders die anfänglich träge ansteigende Pulsfrequenz, den Einfluß arbeitsfremder Pulse bei niedrigen Belastungen, die Schwankungen von über 10 % und im besonderen die fehlende Unabhängigkeit vom Ausgangspuls. Die hierfür von E.A. MÜLLER vorgeschlagene Ruhezeit bis zur sicheren Pulsnormalisierung ist für die Praxis indiskutabel, weil man dann beim gleichen Zeitaufwand einen aussagekräftigeren Versuch durchführen könnte. Nach STEGEMANN

(35) bleibt der LPI oft selbst bei eindeutigen trainingsbedingten Änderungen der Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit unverändert und kann leicht durch arbeitsfremde Einflüsse (Nikotin, Alkohol u.a. mehr) beeinflusst werden.

Zusammenfassend beurteilt ist der LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER wegen seiner relativ geringen Aussagekraft und der geschilderten Argumente verschiedener Autoren für die kardiologische Praxis nicht geeignet. Auch bei kontinuierlicher Belastungssteigerung erscheint es zweckmäßig, praemaximale Leistungen direkt zu messen.

3. Schlußfolgerungen aus der Besprechung der eigenen Versuche und Ergebnisse

Der Vergleich zwischen stufenweiser und kontinuierlicher Belastungssteigerung, wie er in den eigenen experimentellen Untersuchungen durchgeführt wurde, führt zu den im folgenden beschriebenen Schlußfolgerungen.

- (1) Beim Vergleich der Leistungsdaten (Regressionskoeffizienten zwischen Belastung und Pulsfrequenz bzw. Sauerstoffaufnahme, W 170, V_{O_2} 170) aus dem WAHLUND'schen Versuch und den beiden Versuchen mit kontinuierlicher Belastungssteigerung zeigen sich eindeutige Unterschiede. Ausgenommen davon ist die V_{O_2} 170, die nur zufällige Abweichungen feststellen läßt und damit relativ unabhängig von der Form der Belastungssteigerung ist. Verantwortlich für die Unterschiede sind die verschiedenen Belastungshöhen sowie Formen der Belastungssteigerung und die verschiedene Belastungsdauer. Der Versuch nach WAHLUND hat dabei die größte Aussagekraft und wegen der Miterfassung mittlerer Belastungsstufen auch den größten Informationsgehalt. Für die klini-

sche Praxis dauert er allerdings in seiner Originalfassung viel zu lange.

- (2) Bei den kontinuierlichen Formen der Belastungssteigerung sind die Korrelationen zwischen den Belastungswerten und den Kreislauf- und Atemgrößen (Pulsfrequenz, Sauerstoffaufnahme) im wesentlichen gesichert; und beim paarweisen Vergleich dieser Korrelationen zwischen den Versuchsvariationen beim einzelnen Probanden ergeben sich meist nur zufällige Abweichungen. Trotzdem geht die stufenweise Belastungssteigerung mit Ergostase (WAHLUND'scher Versuch) mit einer besseren Adaptation einher, weil bei der kontinuierlichen Belastungssteigerung trotz der minimalen Steigerung pro Zeiteinheit Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme nicht folgen können.
- (3) Der von RUTENFRANZ (30, 31, 32, 33) zur Bestimmung der W 170 bei Kindern und Jugendlichen empfohlene MÜLLER'sche LPI-Versuch ist für das den vorliegenden Untersuchungen zugrunde liegende Probandengut wie alle submaximalen Versuche mit extrapolatorischer Ermittlung der Höchstleistungsfähigkeit nicht geeignet. - Wenn auch die Bindungen der Pulsfrequenz an die Belastung beim LPI-Versuch überraschend gut und in fast der Hälfte der Vergleichsfälle sogar besser als beim Versuch mit kontinuierlicher Belastungssteigerung von 90 Watt bis zu 170 Pulsen/min waren, so ist, falls man sich für die kontinuierliche Belastungssteigerung entschließt, letzterem Versuch wegen der direkten Messung der praemaximalen Leistungsgrößen und der größeren Aussagekraft der Vorzug zu geben. - Der LPI-Versuch nach E.A. MÜLLER wird auch heute von vielen Autoren abgelehnt.
- (4) Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme stehen vor allem jenseits der Dauerleistungsgrenze nicht in streng linearer Abhängigkeit von der Belastung, sondern folgen in der Regel einer geometrisch progressiven Kurve, die nur abschnittsweise in Näherung linearisiert werden kann. - Allein dieser Sachverhalt macht eine direkte Bestimmung der Höchstleistungsfähigkeit zweckmäßig.

Für die Bedürfnisse der täglichen kardiologischen Praxis ist die stufenweise Form der Belastungssteigerung mit Ergostase empfehlenswerter als die kontinuierliche Belastungssteigerung.

Der Versuch nach WAHLUND muß dabei nur so verändert werden, daß sein Zeitbedarf erheblich verringert wird.

F. S C H L U S S F O L G E R U N G E N

Zur Beurteilung der Genauigkeit ergometrischer Testverfahren sind Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Leistungsdaten, der Grad der Bindung der Kreislauf- und Atemgrößen an die Belastung (enge Korrelationen, geringe Streuungen um die Regressionsgerade - "Genauigkeit im engeren Sinne") und die Test-Retest-Reliabilität im einzelnen zu prüfen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden zwischen den einzelnen Versuchen nur die Leistungsdaten numerisch verglichen und so die Aussagekraft geprüft und der Grad der Bindung von Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme an die vorgegebene Belastung analysiert. Da allein diese Maßnahmen eindeutige Aussagen zuließen, konnte auf die Untersuchung der Test-Retest-Reliabilität verzichtet werden.

Aus den Schlußfolgerungen zu B (Kritik der Möglichkeiten der Ergometrie im Hinblick auf die Bedürfnisse in der praktischen Medizin) und aus den Schlußfolgerungen zu E (Besprechung der eigenen Ergebnisse) ergibt sich, daß bei der Beurteilung der Genauigkeit im beschriebenen Sinne nur die stufenweise Belastungssteigerung bis in den Höchstleistungsbereich mit Ergostase auf jeder Stufe für die Kardiologie in Frage kommt. Allerdings soll ein solcher Test nicht länger als 15 Minuten dauern.

Um den genannten Forderungen gerecht werden zu können, kann man folgendermaßen verfahren. - Nach RUTENFRANZ (in VALENTIN et al., Arbeitsmedizin, 38) beginnt eine lineare Abhängigkeit der Pulsfrequenz von der Belastung etwa erst ab einer Belastung von 1 Watt pro Kilogramm Körpergewicht. Dies entspricht der Empfehlung von MELLEROWICZ (24) für submaximale Arbeitsversuche. In diesem Bereich sollte die erste Belastungsstufe von 5 bis 6 Minuten Dauer angesetzt werden. Falls eine Pulsfrequenz in der Ergostase von 120 bis 130 Pulsen/min resultiert, kann man

von mittlerer kardialer Beanspruchung sprechen. Bei niedrigeren Pulsfrequenzen, die man bei submaximalen Belastungen ja schon nach der 2. bis 3. Minute ungefähr beurteilen kann, sollte spätestens nach der 3. Minute die Belastung so erhöht werden, daß in der auf diese Weise neu entstandenen Belastungsstufe in der Ergostase eine Pulsfrequenz von 120 bis 130 Pulsen/min erreicht wird. Die weitere Stufe ist dann so zu wählen, daß etwa 170 Pulse/min in der Ergostase erreicht werden. Ein solcher Versuch dauert 10 bis 12 bis höchstens 15 Minuten. Die Rate of Work 170 (W 170) läßt sich aus der letzten Stufe leicht und so gut wie fehlerfrei errechnen. Für die analogen Größen (V_{O_2} 170 usw.) trifft dasselbe zu. Tabellen, aus denen man die geschätzte erforderliche Belastung für die nächste Stufe aus der Belastung der alten Stufe und der dazugehörigen Pulsfrequenz ablesen kann, sind zu diesem Zweck empfehlenswert, um den Versuch auch vom medizinischen Hilfspersonal durchführen lassen zu können. Eine solche oder ähnliche Versuchsvariation wäre für die Bedürfnisse der täglichen Praxis in der Ergometrie und Kardiologie die Konsequenz aus dem im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen gemachten **Schlußfolgerungen**.

Eine Standardisierung der vorgeschlagenen Versuchsvariationen, vor allem im Hinblick auf den zeitlichen Ablauf, wäre schließlich noch erforderlich. Die Belastung mit 1 Watt pro Kilogramm Körpergewicht könnte beispielsweise als 2 - 3-minütige Probelastung generell durchgeführt werden. Bei voraussichtlich schlechter kardialer Leistungsfähigkeit kann diese Probelastung beliebig niedriger dosiert werden. Allerdings sollte das Minimum des Belastungsbeginns 3 m kp/sec (etwa 30 Watt) nicht unterschreiten. Dies entspricht im Durchschnitt einer Leistung von 30 % der Maximalen Sauerstoffaufnahme, also einer Leistung, bei der nach RUTENFRANZ (in VALENTIN et al., Arbeitsmedizin, 38) das maximale Schlagvolumen erreicht ist und das Herzminutenvolumen bei weiterer Belastungssteigerung nurmehr über die Pulsfrequenz erhöht wird. Aus den Ergebnissen der Probelastung kann dann nach zwei oder drei Minuten tabellarisch die für die Stufe mit mittlerer Kreislaufbeanspruchung nötige Belastung geschätzt werden, oder, falls diese Belastung schon gegeben ist, die Probelastung für weitere 5 bis 6 Minu-

ten beibehalten werden.

Die beschriebene Versuchsvariation hätte eine Reihe von Vorteilen: der verhältnismäßig kurze Zeitbedarf, die Genauigkeit eines Versuches mit stufenweiser Belastungssteigerung und Ergostase auf jeder Stufe, Standardisierung hinsichtlich zeitlichem Ablauf und des kardialen Beanspruchungsbereiches (z. B. im Gegensatz zum Versuch zur Bestimmung der Maximalen Ergostase), leichte und praktisch fehlerfreie Berechnung der Rate of Work 170 (W_{170}) und der analogen Größen (z.B. $V_{O_2 170}$) sowie die Möglichkeit einer Aussage über das Verhalten des Organismus bei mittlerer kardialer Beanspruchung.

Es ist selbstverständlich, daß der Richtwert einer Pulsfrequenz von 170 Schlägen pro Minute als praemaximale Leistung in Analogie zur Abnahme der Maximalen Pulsfrequenz mit zunehmendem Alter ebenfalls angepaßt werden muß. Rate of Work 170 (W_{170}) und die entsprechenden Größen sind also nicht für jedes Lebensalter verbindlich.

Die Sauerstoffaufnahme bei einer Pulsfrequenz von 170 Schlägen/min ($V_{O_2 170}$) läßt sich in Analogie zum Sauerstoffpuls bei Maximaler Ergostase (28, 29) zur Berechnung eines Herzvolumenleistungsquotienten (28, 29) verwenden. Die $V_{O_2 170}$ dürfte wegen ihrer klaren Definition den Maximalen Sauerstoffpuls (28, 29), dem sie numerisch sowieso sehr nahe kommt (15, 28, 29, 42, eigene Ergebnisse), an Genauigkeit sogar noch übertreffen. - In diesem Zusammenhang erscheint noch die Tatsache wichtig, daß die $V_{O_2 170}$ bei unmittelbarer Bestimmung mit kontinuierlicher Belastungssteigerung zu den Werten der $V_{O_2 170}$ beim WAHLUND'schen Versuch keine signifikanten Abweichungen zeigte, und daß der Sauerstoffpuls, dessen Dimension ja die $V_{O_2 170}$ hat, bei Höchstleistungen unabhängig von der Versuchsvariation ist (15). Aus diesen Gründen wäre, wenn man sich allein auf die Bestimmung der $V_{O_2 170}$ beschränken will, auch die kontinuierliche Belastungssteigerung eine geeignete Methode.

G. ZUSAMMENFASSUNG

Vergleiche verbreiteter und allgemein bekannter ergometrischer Testverfahren, ohne daß der Autor eine neue Methode einführte, erfolgten bisher noch nicht allzu oft. Solche Arbeiten liegen beispielsweise aus dem Jahre 1966 von BLOHMKE, STUMPF, STELZER und ARIES (3) in Form einer Gegenüberstellung zweier submaximaler Verfahren, aus dem Jahre 1971 von BÜRGER (4) in Form einer Gegenüberstellung dreier Belastungsformen (IMLT, CMLT, SLT) und neuerdings von SIEBER (34) ebenfalls in Form einer Gegenüberstellung dreier, aber anderer Belastungsformen vor. - Im Rahmen der eignen experimentellen Untersuchungen wurden vor allem verschiedene Formen des Belastungsanstiegs (6-minütige Belastungsstufen, kontinuierliche Belastungssteigerung) untersucht.

Trotz aller Standardisierungsbestrebungen (z.B. 25, 26) werden auch heute noch die unterschiedlichsten ergometrischen Testverfahren angewandt. Deshalb wurde im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen versucht, aus der Vielzahl der Möglichkeiten der Ergometrie unter dem Aspekt eines ökonomischen Verhältnisses zwischen Aufwand und Genauigkeit sowie der Eignung für die tägliche kardiologische Praxis einerseits durch theoretische Betrachtung einer Auswahl gängiger Arbeitsversuche und andererseits durch den experimentellen Vergleich von Belastungsformen, zu Kompromissen zu kommen.

Es stellte sich heraus, daß die für die Kardiologie so wichtigen Leistungsreserven des Herzens nur durch direkte Messung der Höchstleistungsfähigkeit erfaßt werden können, wobei für die praktische Ergometrie die Bestimmung der Rate of Work 170 ($\dot{W}$ 170) und entsprechender Größen (z.B. $\dot{V}O_2$ 170) im praemaximalen Bereich der Leistungsfähigkeit am günstigsten erschienen.

Zur Klärung der Frage der Belastungsform, mit der W 170, V_{O_2} 170 und die analogen Größen bestimmt werden sollen, wurden 60 männliche Versuchspersonen der 3. Lebensdekade auf dem Fahrradergometer spiroergometrisch untersucht. Weil nur methodische Fragen interessierten, gingen lediglich Pulsfrequenz und Sauerstoffaufnahme in die weitere Auswertung ein. Es wurden eine Belastungssteigerung in 6-minütigen Stufen mit kontinuierlichen Formen der Belastungssteigerung (10-Watt-Stufen bei minütlicher Steigerung) untereinander verglichen. Dabei zeigten sich im wesentlichen folgende Ergebnisse.

- (1) Die ermittelten Leistungsdaten stimmten mit denen aus jeweils ähnlichen Versuchen anderer Autoren überein.
- (2) Vergleichbare Leistungsdaten der verschiedenen Versuchsvariationen wichen, mit Ausnahme der V_{O_2} 170, signifikant voneinander ab. Die größte Aussagekraft besitzt aber die Belastungssteigerung in sechsminütigen Stufen, so daß die Ergebnisse der Versuche mit kontinuierlicher Belastungssteigerung an Genauigkeit zu wünschen übrig lassen.
- (3) Die Bindung der Kreislauf- und Atemgrößen an die Belastungssteigerung war bei allen Versuchen ausreichend. Beim Vergleich zwischen den Versuchen ergaben sich einige Unterschiede in der Enge dieser Bindung, die jedoch für die Schlußfolgerungen aus dem Vergleich der Formen der Belastungssteigerung keine große Rolle spielten.

Für die Kardiologie, und hier auch für die tägliche Praxis, empfiehlt sich die stufenweise Belastungssteigerung mit Ergostase auf jeder Stufe. Nur, wenn man die V_{O_2} 170 oder den Sauerstoffpuls im Höchstleistungsbereich allein bestimmen will, können auch andere Formen der Belastungssteigerung wegen der Unabhängigkeit der sogenannten Größen von der Belastungsform verwendet werden. - Für die stufenweise Form der Belastungssteigerung wurden Vorschläge zur Standardisierung und vor allem zur zeitlichen Abkürzung gemacht, weil die stufenweise Belastungssteigerung an sich eine lange Versuchszeit beansprucht. Auf diese Weise können die Rate of Work 170 (W 170) und die zugehörigen Kreislauf- und Atemgrößen nicht nur zuverlässig sondern auch schnell, was für die tägliche Praxis erforderlich ist, in direkter Messung ermittelt werden.

Literatur -I-

L I T E R A T U R

Literatur-II-

- (1) Åstrand, P. O.
Experimental studies of physical working capacity
in relation to sex and age
Copenhagen, Munksgaard 1952
- (2) Åstrand, P. O. und Rhyming, J.
A nomogram for calculation of aerobic capacity from
pulse rate during submaximal work
J. Appl. Physiol. 7 (1954) 218
- (3) Blohmke, Stumpf, Stelzer, Aries
Bestimmung der Zuverlässigkeit von zwei submaximalen
Belastungsverfahren und ihre Beziehung zueinander
Int. Z. angew. Physiol. 23 (1966) 1
- (4) Bürger, D.
Zur Prüfung der Belastbarkeit von ischämisch Herz-
kranken. Ein Vergleich dreier Fahrradergometermetho-
den.
Ärzt. Praxis 85 (1971) 3865
- (5) Bürger, D.
Methodik der Ergometrie
in: Praktische Präventivkardiologie, Seite 61
Urban und Schwarzenberg, München 1972
- (6) Burkhart, K., Kirchhoff, H. W.
Beurteilung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe von In-
dices
Wehrmedizin 3 (1965) 107
- (7) Döring, H.
Lebensversicherungsmedizin 10 (1958) 14
- (8) Ehrenstein, W., Müller-Limmroth, W.
Über die Zuverlässigkeit des LPI nach E.A. Müller
als Kriterium der körperlichen Leistungsfähigkeit
Int. Zschr. Physiol. 26 (1968) 189
- (9) Fleisch, A.
Nouvelles méthodes d'étude des échanges gazeux et
de la fonction pulmonaire
Schwabe, Basel 1954

Literatur-III.

- (10) Fuchs, G.
Mathematik für Mediziner und Biologen
Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1969
- (11) Geigy - Aktiengesellschaft (Pharmazeutische Abteilung)
Documenta Geigy - Wissenschaftliche Tabellen
- (12) Halhuber, M. J., Hofmann, H.
Methodik der Fahrradergometrie an der Klinik Höhenried
Klinik-Arzt 2 (1972) 52
- (13) Halhuber, Milz, Hofmann
Vorbeugung und Wiederherstellung bei Herz- und Kreis-
lauferkrankungen (Aufgaben einer modernen Rehabili-
tationsklinik)
Schriftenreihe der Bayerischen Landesärztekammer,
Band 7 (1967)
- (14) Hofmann, H.
Die Früh- und Funktionsdiagnostik in der Präventiv-
Kardiologie
in: Praktische Präventiv-Kardiologie, Seite 41
Urban und Schwarzenberg, München 1972
- (15) Hollmann, Valentin, Venrath, Bonnekoh
Untersuchungen zum Verhalten des Sauerstoffpulses
unter verschiedenartiger körperlicher Belastung,
unterschiedlicher Arbeitsintensität und -dauer
Der Sportarzt 9 (1961) 248
- (16) Hollmann, W.
Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit des Sportlers
J. A. Barth, München 1963
- (17) Jung, K., Kirchhoff, H. W.
Grundlagen der Spiroergometrie
Ärztliche Praxis 85 (1971) 2023
- (18) Kirchhoff, H. W.
Untersuchungen zur Beurteilung der Leistungsfähig-
keit
Wehrdienst und Gesundheit Bd. 4 (1962) 1

Literatur-IV-

- (19) Kirchhoff, H. W.
Sauerstoffaufnahme und Leistungsfähigkeit
Z. für ärztl. Fortbildung 1 (1964)
- (20) Kirchhoff, H. W.
Praktische Funktionsdiagnostik des Herzens und
Kreislaufs
J. A. Barth, München 1965
- (21) Kirchhoff, H. W.
Funktionsprüfungen des Kreislaufs in der Flug-
medizin
Therapie-Woche 20, 36 (1970) 1948
- (22) Klensch, H.
Verh. dtsch. Ges. f. Kreislaufforsch. (1959) 25
- (23) Knipping, H. W., Valentin, H.
Vita-maxima-Probleme in der praktischen Herzkli-
nik
Therapie-Woche 16 (1963) 681
- (24) Mellerowicz, H.
Ergometrie
Urban u. Schwarzenberg, München - Berlin 1962
- (25) Mellerowicz, Reindell, Hollmann, Mies, Roskamm
Vorschläge zur Standardisierung der ergometri-
schen Leistungsmessung
Z. Kreisl. Fschg. 50 (1961) 273
- (26) Mellerowicz, Roskamm, Hettinger, Hollmann, Klaus, König,
Mies, Reindell, Stoboy
Vorschläge zur Standardisierung der ergometri-
schen Leistungsmessung - II. Mitteilung
Z. Kreisl. Fschg. 53 (1964) 856
- (27) Müller, E. A.
Ein Leistungspulsindex als Maß der Leistungs-
fähigkeit
Arbeitsphysiol. 14 (1950) 271
- (28) Reindell, H., König, K., Roskamm, H.
Funktionsdiagnostik des gesunden und kranken
Herzens
Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1967

Literatur -V-

- (29) Reindell, H., König, K., Hoffmann, G.
Die Belastungsinsuffizienz des Herzens, Diagnostik
und Behandlung
Hrsg.: Boehringer u. Söhne G.m.b.H., Mannheim
- (30) Rutenfranz, J.
Entwicklung und Beurteilung der körperlichen Lei-
stungsfähigkeit bei Kindern und Jugendlichen
S. Karger A.G., Basel 1964
- (31) Rutenfranz, J.
Funktionsdiagnostik des Herz-Kreislaufsystems
in: Opitz, H. und F. Schmid: Handbuch der Kinder-
heilkunde (Bd. II/1) 225
Springer, Berlin - Heidelberg - New York 1966
- (32) Rutenfranz, J.
Die Eignung Jugendlicher zum Leistungssport
Mat. Med. Nordm., Olympia-Heft (1968) 566
- (33) Rutenfranz, J., Mocellin, R.
Untersuchungen über die körperliche Leistungs-
fähigkeit gesunder und kranker Heranwachsender
- I. Bezugsgrößen und Normwerte
Z. für Kinderheilkunde 103 (1968) 109
- (34) Sieber, W.
Vergleich submaximaler Testverfahren - stufen-
weise ansteigende, kontinuierlich ansteigende
und konstante Leistung - zur Untersuchung des
Herz-Kreislaufsystems
Aus dem Flugmedizinischen Institut der Luftwaffe
in Fürstenfeldbruck 1972, noch unveröffentlicht
- (35) Stegemann, J.
Leistungsphysiologie - Physiologische Grundlagen
der Arbeit und des Sports
Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1971
- (36) Valentin, H., Venrath, H.
Einige Bemerkungen zu den Herzfunktionsprüfungen
im Bereich der Vita maxima
Münchener Mediz. Wchschr. 21 (1955) 695

Literatur-VI-

- (37) Valentin, Venrath, Balodimos, Giovannelli
Die maximale Sauerstoffaufnahme (Ein praktisch wichtiger Bruttowert im Vita-maxima-Bereich zur Beurteilung der Belastungs- und Leistungsfähigkeit von Herz und Kreislauf)
Z. Kreisl. Fschg. 44 (1955) 770
- (38) Valentin, H. (Hrsg.)
Arbeitsmedizin
Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart 1971
- (39) Voigt, E. D., Engel, P., Klein, H.
Über den Tagesgang der körperlichen Leistungsfähigkeit
Int. Z. angew. Physiol. 25 (1968) 1
- (40) Wahlund, H.
Determination of the physical working capacity. A physiological and clinical study with special reference to standardization of cardiopulmonary functional tests
Acta med. scand 132, Suppl. 215, Zetterlund and Thelanders, Stockholm 1948
- (41) Weber, E.
Grundriß der biologischen Statistik
V. E. B. Gustav-Fischer-Verlag, Jena 1957
- (42) Wirz, P.
Vergleichende spiroergometrische Untersuchungen bei Sportlern
Schweiz. Z. Sportmed. 13 (1965) 45

Danksagung

Für die Überlassung des Themas möchte ich Herrn Prof. Dr. H.W. Kirchoff, der zur Zeit der Untersuchungen zu dieser Arbeit die Abteilung "Experimentelle Flugphysiologie" des Flugmedizinischen Instituts in Fürstenfeldbruck leitete, danken.

Die Untersuchungen wurden am Flugmedizinischen Institut der Luftwaffe in Fürstenfeldbruck durchgeführt, wofür ich dem damaligen Institutsleiter, Herrn Prof. Dr. E.A. Lauehner, danken möchte.

Herrn Prof. Dr. E. Wetterer (Universität Erlangen) und Herrn Prof. Dr. J. Schmidt (Universität Münster) danke ich für das freundliche Entgegenkommen, die Arbeit vor der Medizinischen Fakultät der Universität Erlangen - Nürnberg vertreten zu haben.

L E B E N S L A U F

Am 19. Juni 1943 wurde ich, Dieter Gäbisch, als Sohn des jetzigen Städtischen Verwaltungsrates i.R. Hermann Gäbisch und seiner Ehefrau Marianne Gäbisch (+ 1954), geb. Drost, in Nürnberg geboren.

Nach dem Besuch der Volksschule in Nürnberg ging ich auf das Realgymnasium Nürnberg, wo ich 1963 die Reifeprüfung ablegte. Von Oktober 1963 bis September 1965 war ich für zwei Jahre bei der Bundeswehr.

Im November 1965 begann ich an der Universität Erlangen-Nürnberg mit dem Medizinstudium. An dieser Universität bestand ich 1966 die Naturwissenschaftliche Vorprüfung, 1968 die Ärztliche Vorprüfung und beendete mein Studium im Sommer 1971, um mich an derselben Universität vom Herbst 1971 bis zum Frühjahr 1972 der Ärztlichen Prüfung zu unterziehen.

Meine Medizinalassistentenzeit dauerte vom April 1972 bis März 1973. Am 1. April 1973 erhielt ich die Approbation zum Arzt und begann meine Weiterbildung zum Facharzt für Innere Medizin am Bundeswehrkrankenhaus in Amberg (Oberpfalz), wo ich bis März 1974 blieb. Seit 1. April 1974 bin ich als Gastarzt an der Medizinischen Universitätsklinik in Erlangen.

